



Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports



2010 – 2012

**Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports
2010–2012**

Herausgeber: Dr. rer. nat. Martin Schneider



VDZ gGmbH
P. O. Box 30 10 63, 40410 Düsseldorf, Germany
Tannenstrasse 2, 40476 Düsseldorf, Germany
Phone: +49 (0) 211 45 78-1
Fax: +49 (0) 211 45 78-296
info@vdz-online.de
www.vdz-online.de

VLB-Meldung

VDZ gGmbH (Hrsg.)

Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports
2010 – 2012

Band 1: 1960 (1961)

Band 32: Bibliographische Deskription nach 2010–2012 (2013)
Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2013

ISSN 0409-2740

ISBN 978-3-7640-0563-4

Fotonachweis Umschlag:
Iller-Wasserkraftwerk AÜW, Kempten
(Ausschnitt)
Fotografin: Brigida Gonzáles

© by Verlag Bau+Technik GmbH
Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH,
Postfach 12 01 10, 40601 Düsseldorf
www.verlagbt.de

Inhaltsverzeichnis / Content

Vorwort	4
Foreword	5
Zeta-Potential und Rheologie von Zementleimen – Einfluss von Fließmittel sowie Hüttensand und Kalksandstein Zeta potential and rheology of cement pastes – influence of superplasticisers and of granulated blastfurnace slag and limestone <i>Jörg Rickert, Düsseldorf</i>	7
Nachaktivierungspotenzial Luftporen bildender Betonzusatzmittel Reactivation potential of air-entraining concrete admixtures <i>Eberhard Eickschen, Düsseldorf</i>	19
Zusammenwirken von Luftporenbildner und Fließmittel in Beton Interactions of air-entraining agents and plasticizers in concrete <i>Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf</i>	41
Auswirkung von Sanden auf die Bewertung potenziell alkalireaktiver Gesteinskörnungen Effect of sand on the evaluation of potentially alkali-reactive aggregates <i>Roland Pierkes, Jörg Rickert, Düsseldorf</i>	59
Aktuelle Regelwerke für Beton Current regulations for concrete <i>Christoph Müller, Düsseldorf</i>	69
Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxis- gerechter Bewertungskriterien für Performance- und WS-Grundprüfungen Experience with ASR test methods: advice on obtaining practical evaluation criteria for performance testing and aggregate testing <i>Christoph Müller, Ingmar Borchers, Eberhard Eickschen, Düsseldorf</i>	81

Vorwort

Mit seinen „Betontechnischen Berichten“ veröffentlicht das Forschungsinstitut der Zementindustrie seit 1960 die Ergebnisse der Arbeiten zu aktuellen betontechnischen und chemisch-mineralogischen Fragestellungen, die sich aus der Vielzahl praktischer Anwendungen von Zement und Beton ergeben. Der vorliegende 32. Band umfasst die Betontechnischen Berichte der Jahre 2010 bis 2012. Bisher nur auf Deutsch erschienene Beiträge wurden für diesen Sammelband ergänzend in die englische Sprache übersetzt.

Moderne Betone sind komplexe Systeme verschiedener Betonausgangsstoffe, die sich in völlig unterschiedlichen Umgebungsbedingungen bewähren müssen. Dabei spielt die Dauerhaftigkeit eines Baustoffs eine wesentliche Rolle bei der Errichtung nachhaltiger Bauwerke. Hier kann die Betonbauweise ihre Stärke voll ausspielen. Aus diesem Grund widmet sich ein erheblicher Teil der Forschung des VDZ diesem zentralen Thema. Eine qualifizierte Bauausführung beruht auf fundierten, permanent weiter entwickelten, stofflichen Grundlagen. Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeit des VDZ beschäftigt sich daher mit dem Zusammenwirken von Zement und Zusatzmitteln. Im vorliegenden Berichtsband stehen neben den Wechselwirkungen von Fließmitteln und den Zementhauptbestandteilen Hüttensand und Kalkstein die Luftporenbildner im Fokus. Untersucht wurden deren Nachaktivierungspotenzial und das Zusammenspiel mit Fließmitteln. In beiden Bereichen leistet das Forschungsinstitut Pionierarbeit. Das gilt sowohl im Hinblick auf das grundlegende Verständnis der Wirkungsmechanismen als auch bezüglich der Anwendung in der Praxis.

Eine langjährige Forschungstätigkeit beschäftigt sich mit den komplexen Aspekten der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Ziel ist die sichere Vermeidung einer schädigenden AKR. Gerade in Bereichen mit besonderen Umgebungsbedingungen bzw. hohen Beanspruchungen ist auch hier die Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III nach RStO (Feuchtigkeitsklasse WS) und Flugbetriebsflächen aus Beton sind der Einwirkung von Tausalz bzw. Taumittel ausgesetzt und müssen zugleich hohe dynamische Lasten aus dem Verkehr aufnehmen. Für diese Bereiche wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) in Düsseldorf mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen ein Verfahren entwickelt, welches vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung anerkannt ist und damit sichere und praxisgerechte Lösungen zur Verfügung stellt.

Im Rahmen der europäischen Normenarbeit für die Revision der EN 206 wurde die Diskussion geführt, welche Aussagen über die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton anhand der Druckfestigkeit des Zements, der Kombination von Zement und Zusatzstoff oder des Betons möglich sind. Umfangreiche Praxiserfahrungen rechtfertigen dieses Vorgehen im Rahmen der jeweiligen nationalen Anwendungsregeln. Für neue Stoffe ist diese Vorgehensweise nicht ohne weitere Überprüfung übertragbar. Daraus ergibt sich ein Schwerpunkt für die Forschung des VDZ auch in den nächsten Jahren. Es wird darum gehen, etwa für neue Zemente mit verminderten Klinkergehalten das Dauerhaftigkeitspotenzial bereits im Vorfeld der bauaufsichtlich relevanten Nachweisführung abschätzen zu können.

Die Betontechnischen Berichte dieses 32. Sammelbandes stellen den aktuellen Wissensstand auf wesentlichen Gebieten der Betontechnologie und der aktuellen Normung in komprimierter Form dar. Alle 32 Bände ergeben zusammen ein umfangreiches und verlässliches Nachschlagewerk für Forscher und Anwender.

Mein Dank gilt den Autoren und allen Beteiligten, die zum Gelingen dieses Bands beigetragen haben.

Düsseldorf, im Dezember 2012

Martin Schneider

Foreword

Since 1960 the Research Institute of the Cement Industry has used the “Concrete Technology Reports” to publish the results of its work on current concrete technology and chemico-mineralogical problems that arise from the large number of practical applications of cement and concrete. The present 32nd volume comprises the concrete technology reports for the years 2010 to 2012. Contributions that have previously appeared only in German have been translated into English for this collected volume.

Modern concretes are complex systems made up of various concrete constituents that have to prove successful under widely differing ambient conditions. The durability of a construction material plays an important part in the erection of sustainable structures, which is where concrete construction can make full use of its performance. For this reason a substantial part of the research by VDZ is devoted to this central topic. Professional construction work is based on qualified building materials that are being continuously refined. One of the focal points of the research work by VDZ therefore deals with the interactions between cement and admixtures. In this volume of reports the emphasis is not only on the interactions between superplasticisers and the main cement constituents, namely granulated blastfurnace slag and limestone, but also on air-entraining agents. Their re-activation potential and their interactions with superplasticisers have been investigated. The Research Institute has carried out pioneering work in both areas. This applies both to the basic understanding of the reaction mechanisms and to practical applications.

Long-term research work has dealt with the complex aspects of the alkali-silica reaction (ASR) with the aim of safely avoiding harmful ASRs. It is necessary to ensure the durability of concrete, especially in areas with special ambient conditions and high stresses. Concrete roads of the construction classes SV and I to III as defined in the RStO (Guidelines for the standardisation of the bearing course of traffic areas) (moisture class WS) and concrete airfields are exposed to the action of de-icing salt or de-icing agents and at the same time have to take heavy dynamic loads from the traffic. A procedure was developed for these areas at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) in Düsseldorf in the form of the 60 °C concrete test with external supply of alkalis. This test is recognised by the Federal Ministry for Transport, Building and Urban Development and therefore provides safe and practical solutions.

During the European standardisation work on revision of EN 206 there was a discussion about the question to what extent the durability properties of concrete can be obtained from the compressive strengths of the cement, of the combination of cement and additions or of the concrete. Extensive practical experience has justified this approach for the respective national application regulations. This procedure cannot be applied to new materials without durability testing, which has provided a focal point for research by the VDZ in the coming years. The aim is to be able to estimate the durability potential of new cements containing reduced levels of clinker prior to the procedure for furnishing proof that is required by the building inspectorate.

The concrete technology reports in this 32nd collected volume represent the current state of knowledge in important fields of concrete technology and current standardisation in compressed form. When taken together, the 32 volumes constitute a comprehensive and dependable reference work for researchers and users.

I would like to thank the authors and all those involved who have contributed to the success of this volume.

Düsseldorf, December 2012

Martin Schneider



Jörg Rickert, Düsseldorf

Zeta-Potential und Rheologie von Zementleimen – Einfluss von Fließmittel sowie Hüttensand und Kalkstein

Zeta potential and rheology of cement pastes – influence of superplasticisers and of granulated blastfurnace slag and limestone

Übersicht

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) wurde der Einfluss von vier gezielt im Labor synthetisierten Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE) auf den Scherwiderstand und insbesondere den Sättigungspunkt von Zementleimen mit zwei handelsüblichen Zementen untersucht. Damit sollte geklärt werden, ob und ggf. aus welchen Parametern der Molekülstruktur von PCE sich eine allgemeine Wirkungsweise in Verbindung mit verschiedenen Zementen ableiten lässt. Rheologischen Untersuchungen zum Scherwiderstand, insbesondere zum Sättigungspunkt, wurden Zeta-Potential-Messungen gegenübergestellt. Des Weiteren wurde der Einfluss von zwei Kalksteinen und zwei Hüttensanden auf das Zeta-Potential und den Scherwiderstand von Leimen damit hergestellter Laborzemente sowie auf die Adsorption eines handelsüblichen PCE untersucht.

PCE mit einer hohen Ladungsdichte waren relativ unabhängig von der Seitenketten- und Hauptkettenlänge bei den untersuchten Zementen in Bezug auf das Erreichen des Sättigungspunkts am wirksamsten. Die Dauer der verflüssigenden Wirkung am Sättigungspunkt korrelierte nicht immer mit der Länge der Seitenketten. Mit steigender Wirkstoffmenge sank der Scherwiderstand und das Zeta-Potential verschob sich, aufgrund der durch die Adsorption der PCE hervorgerufenen Verschiebung der Scherebene, in Richtung des isoelektrischen Punkts (0 mV). Die adsorbierte Wirkstoffmenge, das Zeta-Potential und der Scherwiderstand korrelierten miteinander. Der Sättigungspunkt konnte sowohl anhand rheologischer Messungen über den Scherwiderstand als auch über die Bestimmung des Zeta-Potentials ermittelt werden.

Die untersuchten Kalksteine und Hüttensande können u.a. Sulfat-Ionen aus der Porenlösung adsorbieren, sodass sich ein negatives Zeta-Potential einstellt. Infolgedessen ist auch bei diesen Komponenten eine kompetitive Adsorption zwischen Sulfat-Ionen und Fließmittelmolekülen zu erwarten. Die Erhöhung des Hüttensandanteils führte zu einer deutlichen Absenkung des Scherwiderstands der Zementleime und Verschiebung des Zeta-Potentials in Richtung des isoelektrischen Punkts. Die verwendeten Kalksteine beeinflussten den Scherwiderstand sowie das Zeta-Potential von Zementleim unterschiedlich und deutlicher als die untersuchten Hüttensande.

1 Einleitung

Durch die Herstellung leistungsfähiger Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen tragen die Zementhersteller zur Schonung von Ressourcen, zu einem effizienten Energieeinsatz und somit zum globalen Klimaschutz bei. Vor dem Hintergrund eines für die nächsten Jahrzehnte prognostizierten Anstiegs des weltweiten Bedarfs an Zement werden u.a. leistungsfähige Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen mit noch niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionen entwickelt, die z.B. höhere Gehalte an Kalkstein und/oder Hüttensand aufweisen können als bislang üblich [1, 2]. Mit steigender Substitution von Portlandzementklinker werden die Eigenschaften der Zemente zunehmend durch die entsprechenden weiteren Hauptkomponenten bestimmt.

Abstract

The influence of four PCE-based superplasticisers (synthesized selectively in the laboratory) on the shear resistance, especially at the saturation point, of cement pastes was investigated at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) using two commercially available cements. The intention was to clarify whether, and possibly from which parameters of the molecular structure of the PCE (polycarboxylate ether), it is possible to deduce a general mode of operation in conjunction with different cements. Rheological investigations of the shear resistance, especially at the saturation point, were compared with zeta potential measurements. The influence of two limestones and two granulated blastfurnace slags on the zeta potential and the shear resistance of laboratory cements produced with them, as well as on the adsorption of a commercially available PCE, was also examined.

For the cements investigated the PCEs with high charge densities were relatively independent of the lengths of the side and main chains with respect to reaching the saturation point most effectively. The duration of the plasticizing action on the saturation point did not always correlate with the lengths of the side chains. The shear resistance fell with increasing quantity of active substance and the zeta potential was displaced in the direction of the isoelectric point (0 mV) due to the displacement of the shear plane caused by adsorption of the PCE. There was a correlation between the quantity of active substance adsorbed, the zeta potential and the shear resistance. The saturation point was determined both with the aid of rheological measurements of the shear resistance and by determining the zeta potential.

The limestones and granulated blastfurnace slags investigated were able to adsorb sulfate ions from the pore solution, resulting in a negative zeta potential. Competitive adsorption between sulfate ions and plasticizer molecules is therefore also to be expected with these components. Increasing the proportion of granulated blastfurnace slag led to a significant drop in the shear resistance of the cement pastes and displacement of the zeta potential in the direction of the isokinetic point. The limestones used affected the shear resistance and the zeta potential of the cement paste to different extents and more significantly than the granulated blastfurnace slags investigated.

1 Introduction

By producing efficient cements with several main constituents the cement producers are contributing to conserving resources and the efficient use of energy and therefore to global climate protection. Efficient cements with several main constituents and with even lower specific CO₂ emissions that can, for example, contain higher levels of limestone and/or granulated blastfurnace slag than have been usual in the past are being developed against the background of a predicted rise in the worldwide demand for cement over the coming decades [1, 2]. The increasing replacement of Portland cement clinker means that the properties of the cements are determined increasingly by the other main constituents.

Leistungsfähige und dauerhafte Betone werden heute großenteils mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln hergestellt. Somit steigt die Bedeutung der Kenntnis über die Wechselwirkungen zwischen verflüssigenden Betonzusatzmitteln und den Zementhauptkomponenten neben dem Klinker. So können sich insbesondere in Verbindung mit Fließmitteln bislang unbekannte oder weniger beachtete Wechselwirkungen, z.B. mit Kalkstein und Hüttensand, ergeben. Diese Wechselwirkungen können u.a. durch die Kombination von Untersuchungen zur Adsorption, zur Rheologie und zum Zeta-Potential dargestellt werden.

Die vorgestellten Untersuchungen tragen dazu bei, den Kenntnisstand über die Wirkung von Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE) auf die Rheologie und das Zeta-Potential von Leimen aus Portlandzement sowie Zementen mit unterschiedlichen Anteilen an Hüttensand oder Kalkstein zu erweitern. Das soll den Betontechnologen helfen im Vorfeld abzuschätzen, welche Wechselwirkungen in dem von ihm geplanten Beton zu erwarten sind. Somit kann der Umfang von Erstprüfungen verringert und das Auftreten unerwünschter Reaktionen im Frischbeton, wie z.B. unkontrolliertes Ansteifen oder Nachverflüssigen bzw. starkes Wasserabsondern etc. vermindert werden.

2 Stand der Kenntnis

Die Verwendung von Kalkstein und Hüttensand einzeln oder auch kombiniert als Zementhauptbestandteile ist gängige Praxis und seit langem bewährt [3]. Der Einsatz von Betonzusatzmitteln zur Steuerung von Frisch- und Festbetoneigenschaften ist Stand der Technik. Etwa 90 % der in Deutschland hergestellten Betone enthalten Betonzusatzmittel. Im Jahr 2009 betrug der Verbrauch an Betonzusatzmitteln in Deutschland rd. 7 kg je Tonne Zement. Insgesamt stehen in Deutschland derzeit mehr als 550 Betonzusatzmittel zur Verfügung, die 15 unterschiedlichen Wirkungsgruppen zugeordnet sind. Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM) bilden mit einem Anteil von rd. 85 % die größte Gruppe der eingesetzten Betonzusatzmittel. Die klassischen Fließmittelwirkstoffe Lignin-, Melamin- und Naphthalinsulfonat werden zunehmend durch Polycarboxylatether (PCE), etwa 60 % der verwendeten Fließmittel, ersetzt. Die Wirkungsmechanismen von Fließmitteln wurden in der Vergangenheit umfangreich untersucht und sind heute weitgehend bekannt [4–18]. Die Wirkung von Verflüssigern und Fließmitteln ist von der Sorption der negativ geladenen Zusatzmittelmoleküle an positiv geladenen Bereichen der Zementoberfläche bzw. ersten Hydrationsprodukten abhängig. Die verflüssigende Wirkung von Lignin-, Melamin- und Naphthalinsulfonat beruht auf einer elektrostatischen Abstoßung. Die verflüssigende Wirkung von PCE ist im Wesentlichen auf die sterische, d.h. räumliche Abstoßung durch die Seitenketten zurückzuführen. Beides vermindert die Agglomeratbildung der Zementkörner und anderer feiner Feststoffpartikel. Bei PCE kann u.a. durch Variation der Ladungsdichte sowie der Länge der Hauptkette bzw. Seitenketten die Adsorption gezielt verändert werden, wodurch z.B. eine starke Anfangsverflüssigung bzw. eine verlängerte Verarbeitungszeit von Betonen erzielt werden können.

Das Zeta-Potential gibt Hinweise über die Ladungsverhältnisse an Partikeloberflächen, wodurch die Adsorption von Fließmitteln auf der Zementoberfläche bzw. ersten Hydrationsprodukten verfolgt werden kann. Hierzu wurden u.a. in [6, 15, 17, 19, 20–28] umfangreiche Untersuchungen vorgenommen. Dennoch kann die häufig auftretende Frage, warum z.B. ein Fließmittel bei verschiedenen Zementen unterschiedlich wirksam ist, oft nicht ausreichend beantwortet werden. Hierzu fehlen systematische Grundlagenuntersuchungen sowie die Verknüpfung von Untersuchungen auf molekularer Ebene mit z.B. rheologischen Untersuchungen.

3 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens war es, festzustellen, ob und ggf. aus welchen Parametern der Molekülstruktur von PCE sich eine allgemeine Wirkungsweise in Verbindung mit verschiedenen Zementen ableiten lässt. Des Weiteren sollte geklärt werden, welcher Zusammenhang zwischen dem anhand rheologischer Messungen und dem über das Zeta-Potential ermittelten Sättigungspunkt besteht

The majority of efficient and durable concretes are now produced with plasticizing concrete admixtures. It has therefore become more important to understand the interactions between plasticizing concrete admixtures and the main cement constituents in addition to clinker. Interactions, e.g. with limestone and granulated blastfurnace slag, that have previously been unknown or have attracted little attention can occur, especially in conjunction with superplasticizers. These reactions can be demonstrated by combining the investigations into adsorption, rheology and the zeta potential.

The investigations presented here contribute to extending the understanding of the effect of superplasticizers based on polycarboxylate ether (PCE) on the rheology and zeta potential of pastes made from Portland cement and from cements containing different proportions of granulated blastfurnace slag or limestone. This should help concrete technologists to estimate in advance the interactions to be expected in the concretes that they have designed. It can reduce the amount of initial testing and the occurrence of unwanted reactions in the fresh concrete, such as uncontrolled stiffening, secondary plasticizing effects or severe bleeding, etc.

2 Present state of knowledge

It is current practice to use limestone and granulated blastfurnace slag, individually or in combination, as cement main constituents and this has proved successful over a long period [3]. The use of concrete admixtures to control the fresh and hardened concrete properties is state of the art. About 90 % of the concretes produced in Germany contain concrete admixtures. In 2009 the consumption of concrete admixtures in Germany amounted to about 7 kg per tonne of cement. At present there are more than 550 concrete admixtures available in Germany that can be assigned to 15 different active groups. Concrete plasticizers and superplasticizers form the largest group of concrete admixtures used and account for about 85 % of the admixtures. The classical active substances in superplasticizers, namely lignin, melamine and naphthalene sulfonates, are being increasingly replaced by polycarboxylate ether, which accounts for about 60 % of the superplasticizers used. The action mechanisms of superplasticizers have been extensively investigated in the past and are now very largely understood [4–18]. The action of plasticizers and superplasticizers is dependent on the sorption of the negatively charged admixture molecules on positively charged regions of the cement surface and initial hydration products. The plasticizing action of lignin, melamine and naphthalene sulfonates is based on electrostatic repulsion. The plasticizing action of PCE is attributable mainly to the steric, i.e. spatial, repulsion by the side chains. Both mechanisms reduce the formation of agglomerates by the cement grains and other fine solid particles. With PCE the adsorption can be varied selectively by, among other things, varying the charge density and the lengths of the main chain and side chains. This could achieve a strong initial plasticizing effect or an extended workability time of the concretes.

The zeta potential provides information about the charge conditions on the particle surface, which makes it possible to follow the adsorption of superplasticizers on the cement surface and initial hydration products. Extensive investigations on the subject have been carried out in [6, 15, 17, 19, 20–28] among others. In spite of this there is often no adequate answer to the question that frequently occurs about why a superplasticizer affects different cements in different ways. There is a lack of systematic basic research and of a link between investigations at the molecular level and, for example, the rheological investigations.

3 Research objective and investigative procedure

The aim of the research project was to establish whether, and possibly from which parameters of the molecular structure of PCE, it is possible to deduce a general mode of operation in relation to different cements. The intention was also to clarify the relationship between the saturation point determined using rheological measurements and that determined by the zeta potential and how limestone and granulated blastfurnace slag used as cement main

und wie Kalkstein sowie Hüttensand als Zementhauptbestandteil das Zeta-Potential und die Adsorption von PCE beeinflussen können.

Dazu wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) der Einfluss von vier gezielt im Labor synthetisierten Fließmitteln auf der Basis von PCE (FM01 bis FM04) auf den Scherwiderstand, insbesondere den Sättigungspunkt, von Zementleimen mit zwei handelsüblichen Zementen (Z01, Z06) untersucht. Zudem wurde der Einfluss der Molekülstruktur der PCE auf die Adsorption und die Wirkung der PCE-Fließmittel ermittelt. Rheologischen Untersuchungen zum Scherwiderstand wurden Zeta-Potential-Messungen gegenübergestellt. Des Weiteren wurde der Einfluss von zwei Kalksteinen (LL1, LL2) und zwei Hüttensanden (S1, S2) auf das Zeta-Potential und den Scherwiderstand von Leimen damit hergestellter Laborzemente sowie auf die Adsorption eines handelsüblichen PCE (FM05) untersucht.

4 Ausgangsstoffe

4.1 Zemente und Zementhauptbestandteile

Für die Untersuchungen mit den vier synthetisierten Fließmitteln wurden zwei handelsübliche Portlandzemente CEM I 42,5 N verwendet. Für die Untersuchung des Einflusses von Kalkstein und Hüttensand als Zementhauptbestandteile auf das Zeta-Potential von Zement wurden Laborzemente mit verschiedenen Anteilen an Hüttensand bzw. Kalkstein und gleicher Portlandzementklinker-basis (Zement Z01) hergestellt. Hierzu wurden zwei Kalksteine (LL1, LL2) bzw. zwei Hüttensande (S1, S2) verwendet, die in der Praxis zur Herstellung von Zementen eingesetzt werden. Die Zemente sowie Kalksteine und Hüttensande wurden chemisch-mineralogisch und physikalisch untersucht und entsprachen DIN EN 197-1. Die Analysedaten der verwendeten Portlandzemente, Kalksteine und Hüttensande sind in Tafel 1 enthalten.

4.2 Fließmittel

Anhand einer Datenbasis über die Molekülstruktur handelsüblicher Fließmittel wurden für gezielte Untersuchungen des Einflusses der Molekülstruktur von PCE auf die Verflüssigung vier PCE (FM01 bis FM04) mit definierten Haupt- und Seitenkettenlängen sowie festgelegten Ladungsdichten am Lehrstuhl für Bauchemie der TU München (TUM) gezielt synthetisiert. Die Polycarboxylate wurden aus Methacrylsäure und Methacrylsäure- ω -methoxy-polyethylenglykol durch radikalische Polymerisation hergestellt. Die Hauptkettenlänge variierte zwischen 27 und 260 Methacrylsäure-Monomeren. Die Seitenkettenlänge betrug 17 bzw. 111 Ethylenoxid-Einheiten (PEO). Die Ladungsdichte, ausgedrückt als Verhältnis COO/Ester, wurde auf 6 (hohe Ladungsdichte) bzw. 1,5 (niedrige Ladungsdichte) eingestellt. Die Molekülstrukturen der synthetisierten Fließmittel stellten in etwa die Eckwerte bislang durch das FIZ analysierter handelsüblicher PCE dar. Neben den synthetisierten PCE wurde auch ein handelsübliches Fließmittel auf der Basis von PCE (FM05) verwendet.

Die Fließmittel FM01 bis FM03 bzw. FM05 entsprachen DIN EN 934-2 und wurden über Gel-Permeations-Chromatographie (GPC) an der TUM bzw. über ^{13}C -NMR-Spektroskopie am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz analysiert. Die wesentlichen Parameter der Fließmittel sind in Tafel 2 angegeben.

5 Zementleimversuche

5.1 Zusammensetzung und Herstellung der Zementleime

Die Zementleime wurden mit deionisiertem Wasser mit einem Wasserzementwert von 0,45 im Mörtelmischer gemäß DIN EN 196 hergestellt. Die Fließmittel wurden stets 60 s nach der Wasserrzugabe zugegeben. Die Gesamtmischzeit betrug drei Minuten. Der Wassergehalt des jeweiligen Fließmittels wurde dem Zugabewasser angerechnet. Bei einigen Zementleimen wurde durch Zugabe von Natriumsulfat der Anteil an gelöstem Sulfat im Zugabewasser auf rd. 31 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ erhöht. Wenn nicht anders dargestellt, ist die jeweilige Fließmittelmenge als Wirkstoffmenge angegeben und bezieht sich auf die jeweilige Zementmasse.

constituents can influence the zeta potential and the adsorption of PCE.

The influence of four PCE-based superplasticizers (FM01 to FM04) synthesized selectively in the laboratory on the shear resistance, and particularly on the saturation point, of cement pastes made from two commercially available cements (Z01, Z06) was examined at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry). The influence of the molecular structure of the PCE on the adsorption and the action of the PCE superplasticizer was also determined. Rheological investigations into the shear resistance were compared with zeta potential measurements. The influence of two limestones (LL1 and LL2) and two granulated blastfurnace slags (S1, S2) on the zeta potential and shear resistance of pastes made from laboratory cements produced with them and on the adsorption of a commercially available PCE (FM05) was also examined.

4 Starting materials

4.1 Cements and cement main constituents

Two commercially available CEM I 42,5 N Portland cements were used for the investigations with the four synthesized superplasticizers. Laboratory cements containing different proportions of granulated blastfurnace slag or limestone and based on the same Portland cement clinker (cement Z01) were produced for examining the influence of limestone and granulated blastfurnace slag (as cement main constituents) on the zeta potential of cement. Two limestones (LL1, LL2) and two granulated blastfurnace slags (S1, S2) that are used in practice for producing cements were employed. The cements as well as the limestones and granulated blastfurnace slags were examined chemically, mineralogically and physically, and complied with DIN EN 197-1. The analysis data for the Portland cements, limestones and granulated blastfurnace slags used are shown in Table 1.

4.2 Superplasticizers

Four PCEs (FM01 to FM04) with specific main and side chain lengths and defined charge densities were synthesized selectively in the Construction Chemistry faculty at Munich Technical University (TUM) with the aid of a database for the molecular structures of commercially available superplasticizers. These were used for examining the influence of the molecular structure of the PCE on the plasticizing effect. The polycarboxylates were produced from methacrylic acid and methacrylic acid ω -methoxy-polyethylene glycol by radical polymerization. The main chain lengths varied between 27 and 260 methacrylic acid monomers. The side chains had lengths of 17 or 111 ethylene oxide units. The charge density, expressed as the COO/ester ratio, was set at 6 (high charge density) or 1.5 (low charge density). The molecular structures of the synthesized superplasticizers are an approximate representation of the parameters of the commercially available PCEs analyzed so far by the FIZ. A commercially available PCE-based superplasticizer (FM05) was also used in addition to the synthesized PCEs.

The superplasticizers FM01 to FM03 and FM05 complied with DIN EN 934-2 and were analyzed by gel permeation chromatography (GPC) at the TUM and by ^{13}C NMR spectroscopy at the Max Planck Institute for Polymer Research in Mainz. The main parameters of the superplasticizers are given in Table 2.

5 Cement trials

5.1 Composition and production of the cement pastes

The cement pastes were produced with de-ionized water with a water/cement ratio of 0.45 in a mortar mixer complying with DIN EN 196. In each case the superplasticizer was added 60 s after the water addition. The total mixing time was three minutes. Allowance for the water content of the particular superplasticizer was made in the amount of mixing water. For some cement pastes the amount of dissolved sulfate in the mixing water was raised to about 31 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ by the addition of sodium sulfate. Unless stated otherwise the quantity of the particular superplasticizer is specified as the amount of active substance and relates to the respective mass of cement.

Tafel 1: Analysedaten der verwendeten Zemente, Kalksteine und Hüttensande
Table 1: Analysis data for the cements, limestones and granulated blastfurnace slags used

Parameter	Einheit/Unit	CEM I 42,5 N Z01 ¹⁾	CEM I 42,5 N Z06 ²⁾	Parameter	Kalkstein Limestone LL1	Kalkstein Limestone LL2	Hüttensand Gbs S1	Hüttensand Gbs S2
H ₂ O	M.-%	1,87	1,00	H ₂ O	0,16	1,23	0,63	0,30
CO ₂	M.-%	0,70	0,96	CO ₂	43,44	38,61	0,43	1,01
SiO ₂	M.-%	19,66	21,05	SiO ₂	0,15	7,34	34,83	37,44
Al ₂ O ₃	M.-%	4,98	5,21	Al ₂ O ₃	0,01	2,35	11,54	10,36
TiO ₂	M.-%	0,22	0,30	TiO ₂	0,03	0,12	0,89	0,42
P ₂ O ₅	M.-%	0,10	0,15	P ₂ O ₅	0,01	0,03	0,01	0,01
Fe ₂ O ₃	M.-%	2,75	2,50	Fe ₂ O ₃	0,01	0,81	0,30	0,45
Mn ₂ O ₃	M.-%	0,14	0,08	Mn ₂ O ₃	0,03	0,01	0,31	1,19
CaO	M.-%	62,98	64,65	CaO/CaCO ₃	55,53/99,1	46,81/83,5	41,45/–	36,54/–
MgO	M.-%	2,51	1,75	MgO	0,42	1,25	6,84	9,29
SO ₃	M.-%	2,88	3,29	SO ₃ /S ²⁻	0,03/–	0,65/–	0,19/1,21	0,18/0,84
K ₂ O	M.-%	1,07	1,13	K ₂ O	0,02	0,69	0,41	1,27
Na ₂ O	M.-%	0,15	0,20	Na ₂ O	0,02	0,09	0,21	0,38
Na ₂ Oäq. Na ₂ Oeq.	M.-%	0,85	0,94	Na ₂ Oäq. Na ₂ Oeq.	0,03	0,54	0,48	1,21
C ₃ S	M.-%	67,2	67,1	TOC	0,01	0,09	–	–
C ₂ S	M.-%	7,8	8,9	Meth. blauw. Meth. blue value	0,03	0,33	–	–
C ₃ A k./o.	M.-%	1,6/5,8	6,3/2,8	Glasgehalt glass content	–	–	91	96
C ₄ AF	M.-%	8,6	7,4					
Dichte Density	g/cm ³	3,08	3,13	Dichte Density	2,69	2,69	2,88	2,88
Blaine	cm ² /g	3240	2830	Blaine	7000	4380	4260	4220
x'	µm	21,36	25,12	x'	10,87	17,42	17,98	16,34
n	–	0,89	0,94	n	0,76	0,88	0,92	0,80
WA	M.-%	29,5	27,0	BET [cm ² /g]	11881	73812	15463	11593
EB	min	200	175	in deion. H ₂ O	27	–35	5	–30
Druckf. Compr. str. 2d/28d	MPa	26,9/53,9	26,3/52,9	Porenlösg. ¹⁾ Pore soln. ¹⁾	–8	–33	–20	–20

WA: Wasseranspruch; EB: Erstarrungsbeginn/WA: water demand; EB: initial setting time

Zusammensetzung der Porenlösung im Alter von 10 Minuten in mg/l/Composition of the pore solution after 10 minutes in mg/l:

¹⁾ Z01: Ca²⁺: ~600; SO₄²⁻: ~11 250; K⁺: ~12 000; Na⁺: ~400; pH 13,3

²⁾ Z06: Ca²⁺: ~750; SO₄²⁻: ~14 500; K⁺: ~14 500; Na⁺: ~800; pH 13,4

³⁾ Lösung/Feststoff/Solution/solids = 0,45

5.2 Bestimmung des Scherwiderstands und des Sättigungspunkts von Zementleim

Der Scherwiderstand der Zementleime wurde mit einem Rotationsviskosimeter bestimmt. Die Leime wurden jeweils fünf Minuten bei 60, 80, 100 und dann wieder bei 80 U/min geschert. Der Sättigungspunkt beschreibt die Menge an Fließmittel, ab der der Zementleim den geringsten Scherwiderstand, d.h. die maximale Fließfähigkeit aufweist und die Fließgrenze nahezu bis auf Null abgesunken ist. Zur Bestimmung des Sättigungspunkts wurde der

5.2 Determination of the shear resistance and saturation point of cement paste

The shear resistances of the cement pastes were determined with a rotation viscometer. The pastes were sheared for five minutes each at 60, 80, 100 and then 80 rpm again. The saturation point describes the quantity of superplasticizer at which the cement paste has the lowest shear resistance, i.e. maximum flowability, and the yield value has fallen to almost zero. The shear resistances of the pastes after about 19 minutes at 80 rpm were used for determining

Tafel 2: Analysedaten der verwendeten Fließmittel
Table 2: Analysis data for the superplasticisers used

Fließmittel Plasticizer	Feststoffgehalt Solids content	mol. Masse Mol. mass M_w	mol. Masse Mol. mass M_n	Monomere/Hauptkette Monomer/main chain	PEO/Seitenkette PEO/side chain	COO-/Ester
	M.-%	10^5 g/mol	10^5 g/mol	–	–	–
FM01	24	1,41	0,50	~260	~17	6
FM02	22	0,82	0,25	~63	~17	1,5
FM03	15	2,83	0,76	~105	~111	6
FM04	15	1,84	0,50	~27	~111	1,5
FM05	35	1,35	0,49	~100	~100	457 ¹⁾

¹⁾ spezif. anion. Ladung in 10^{-6} eq/g, bestimmt mit DADMAC
spec. anionic charge in 10^{-6} eq/g, determined by DADMAC

Scherwiderstand der Leime nach rd. 19 Minuten bei 80 U/min herangezogen. Für jede Fließmitteldosierung wurde eine Einzelmessung durchgeführt. Dadurch wird der Wassorzementwert nicht verändert und das Sorptionsverhalten entspricht den Bedingungen in der Praxis.

5.3 Gewinnung und Analyse von Porenlösung

Zur Gewinnung von Porenlösung wurden Leimproben rd. 10 Minuten nach Wasserzugabe mittels Vakuumpumpe über einen Büchnertrichter mit Blaubandfilter ca. 1 Minute lang abfiltriert. Bis zur Filtration lagerten die Leimproben in dicht verschlossenen PE-Weithalsflaschen bei 20 °C. Alle Porenlösungen wurden über einen 0,45-µm-Teflon-Membranfilter filtriert, mit Argon überspült und in dicht verschließbaren PP-Röhrchen bis zur Analyse gelagert. Die Porenlösungen wurden auf die Gehalte an SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ hin ionenchromatographisch untersucht. Zur Beurteilung der Sorption der Fließmittel wurde der TOC-Gehalt (Total Organic Carbon) durch thermisch-katalytische Oxidation/IR-Detektion bestimmt.

5.4 Bestimmung des Zeta-Potentials

Werden Kolloidalteilchen z.B. durch Ultraschall oder durch Anlegen eines elektrischen Felds angeregt, bewegen sich die Teilchen mit den an ihrer Oberfläche adsorbierten Ionen entlang einer Scherebene (Bild 4, links, Bereich Ψ_0). Die diffuse Schicht verbleibt nahezu stationär. Das Zeta-Potential ist das elektrische Potenzial, welches zur Trennung des dispergierten schwingenden Teilchens mit den adsorbierten Ionen von der diffusen Schicht (Dispergiermittel) notwendig ist [19]. Veränderungen der Zementkornoberfläche, wie z.B. die Bildung von Hydratphasen, die Adsorption von Ionen oder Zusatzmittelmolekülen beeinflussen das Zeta-Potential und lassen sich somit verfolgen. Das Zeta-Potential wurde mittels elektroakustischer Messmethode [29] an Leimen mit einem Wasser/Feststoff-Wert von 0,45 rd. 5 min direkt nach der Herstellung bestimmt. Vor jeder Messung wurde der Einfluss der Ionen in der Lösung auf das Zeta-Potential (Ionen-vibrationsstrom) ermittelt und bei der Bestimmung des Zeta-Potentials des Zementleims berücksichtigt. Bei Kalksteinen und Hüttensanden wurde als Dispergiermittel deionisiertes Wasser sowie Porenlösung von Zement Z01 verwendet, die im Alter von rd. 10 Minuten gewonnen wurde.

6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

6.1 Scherwiderstand und Adsorption

Bild 1 zeigt den Verlauf des Scherwiderstands von Zementleim mit Zement Z01 (links) und Zement Z06 (rechts) in Abhängigkeit der Molekülstruktur und Zugabemenge der synthetisierten PCE (FM01 bis FM04). Der im Vergleich zu Zementleim mit Zement Z06 wesentlich höhere Scherwiderstand von Zementleim mit

the saturation point. A single measurement was carried out for each addition level of the superplasticizer. The water/cement ratio was not altered and the sorption behaviour corresponds to the conditions found in practice.

5.3 Obtaining and analyzing the pore solution

The pore solutions were obtained by filtering the paste samples for about 1 minute with a vacuum pump through a Buchner funnel using a blue ribbon filter about 10 minutes after the addition of water. Before the filtration the paste samples were stored in tightly sealed wide-neck PE bottles at 20 °C. All the pore solutions were filtered through a 0.45 µm Teflon membrane filter, flushed with argon and stored in small, tightly sealed, PP tubes until analyzed. The pore solutions were examined for their levels of SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , and Na^+ by ion chromatography. The TOC (total organic carbon) content was determined by thermo-catalytic oxidation/IR detection to assess the sorption of the superplasticizer.

5.4 Determination of the zeta potential

If colloidal particles are activated, e.g. by ultrasound or by applying an electric field, then the particles, together with the ions adsorbed on their surfaces, move along a shear plane (Fig. 4, left, area Ψ_0). The diffuse layer remains virtually stationary. The zeta potential is the electric potential that is necessary to separate the dispersed oscillating particles with adsorbed ions from the diffuse layer (dispersing agent) [19]. Changes to the cement particle surface, such as the formation of hydrate phases or the adsorption of ions or admixture molecules, affect the zeta potential and can therefore be followed by it. The zeta potential was determined immediately after production using electro-acoustic measurements [29] on pastes with a water/solids ratio of 0.45. The influence of the ions in the solution on the zeta potential (ion vibration flow) was established before each measurement and taken into account in the determination of the zeta potential of the cement paste. With limestones and granulated blastfurnace slags de-ionized water was used as the dispersing agent as well as pore solution from cement Z01 that had been obtained at an age of about 10 minutes.

6 Representation and discussion of the results

6.1 Shear resistance and adsorption

Fig. 1 shows shear resistance curves of cement paste made from cement Z01 (left) and cement Z06 (right) as a function of the molecular structure and the quantity of synthesized PCE (FM01 to FM04) added. The substantially higher shear resistance of cement paste made from cement Z01 compared with that made from cement Z06 could be attributed, among other things, to the greater reactivity of the clinker due to the higher propor-

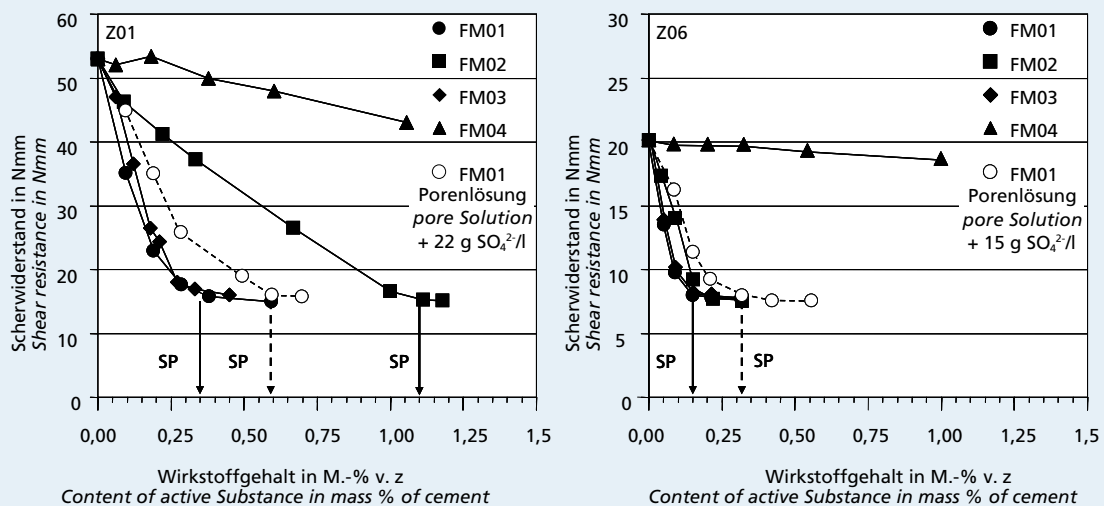


Bild 1: Verlauf des Scherwiderstands von Zementleim (links: Z01; rechts: Z06, CEM I 42,5 N, w/z = 0,45) im Viskomat (bei 80 U/min nach rd. 19 Minuten) in Abhängigkeit der Molekülstruktur und Zugabemenge von PCE (Wirkstoff); für FM01 zusätzlich bei erhöhtem Anteil an gelöstem Sulfat auf rd. 31 g/l, Pfeil kennzeichnet den jeweiligen Sättigungspunkt (SP)

Figure 1: Curves showing the shear resistance of cement pastes (left: Z01; right: Z06, CEM I 42,5 N, w/c = 0.45) in the Viskomat (at 80 rpm after about 19 minutes) as a function of the molecular structure and quantity of the PCE (active substance) added; for FM01 also with increased amount of dissolved sulfate at about 31 g/l, arrows show the respective saturation points (SP)

Zement Z01 war u.a. auf eine höhere Reaktivität des Klinkers, bedingt durch den höheren Anteil an orthorhombischem C_3A , zurückzuführen. Aus der linken Grafik von Bild 1 geht hervor, dass die beiden Fließmittel FM01 und FM03 mit einer hohen Ladungsdichte der Hauptkette ($COO^-/Ester = 6$), relativ unabhängig von der Haupt- und Seitenkettenlänge den Scherwiderstand des Zementleims mit Zement Z01 bei einer Zugabemenge von rd. 0,35 M.-% v.z auf rd. 16 Nmm abgesenkt haben. Der Kurvenverlauf zeigt, dass bei dieser Dosiermenge der Sättigungspunkt (SP) erreicht war und eine weitere Fließmittelzugabe zu keiner weiteren Absenkung des Scherwiderstands führte. Mit Fließmittel FM02 wurde die maximale Verflüssigung (SP) bei einer Zugabemenge von rd. 1,10 M.-% v.z erreicht.

tion of orthorhombic C_3A . From the left-hand diagram in Fig. 1 it can be seen that at an addition level of about 0.35 mass % w.r.t. cement the two plasticizers FM01 and FM03 with a high charge density on the main chain ($COO^-/ester = 6$) have lowered the shear resistance of the cement paste made from cement Z01 to about 16 Nmm relatively independently of the lengths of the main and side chains. The shapes of the curves show that the saturation point (SP) was reached at this addition level and further addition of superplasticizer did not lead to any further reduction in the shear resistance. With superplasticizer FM02 the maximum plasticizing effect (SP) was reached at an addition level of about 1.10 mass % w.r.t. cement.

The right-hand diagram in Fig. 1 shows that for cement paste made from cement Z06 the superplasticizer FM02 exhibited approximately the same effect as superplasticizers FM01 and FM03. The saturation point lay at a quantity of active substance of about 0.15 mass % superplasticizer w.r.t. cement. The shear resistance was reduced to about 8 Nmm. The superplasticizer FM04 exhibited only a slight plasticizing effect with both cements. Increasing the proportion of dissolved sulfate in the pore solution by the addition of sodium sulfate by 22 g SO_4^{2-}/l or 15 SO_4^{2-}/l to about 31 g SO_4^{2-}/l pore solution made superplasticizer FM01 less effective with both cements. In both cases the saturation point was displaced towards a larger quantity of active substance. This can be attributed to competitive adsorption between the negatively charged sulfate ions and the anionic PCE molecules. At high levels of sulfate ions there are fewer sorption positions available to the superplasticizer molecules on the positively charged areas of the surfaces of the cement particles.

Fig. 2 shows the quantity of adsorbed superplasticizer and the sulfate content of the pore solution for cement pastes made from cements Z01 and Z06 plotted against the shear resistance. The shear resistance of the cement pastes fell with increasing quantity of adsorbed superplasticizer, essentially due to the reduction of the yield value.

When compared with the other superplasticizers FM03 reduced the shear resistance of the cement paste made from cement Z01 somewhat better in the range from about 20 to about 40 Nmm in spite of the smaller quantity adsorbed. This is presumably attributable to the significantly longer side chains (SK) of

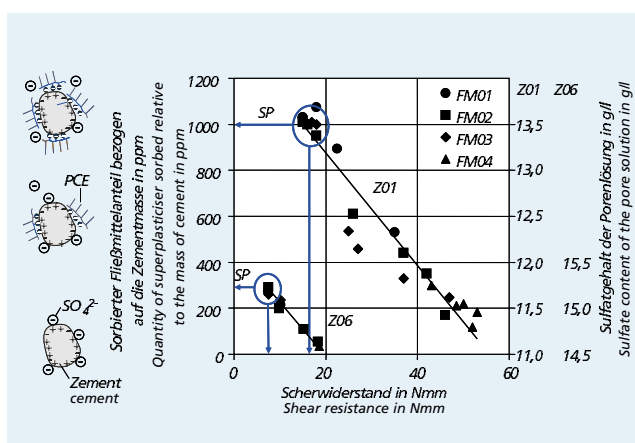


Bild 2: Einfluss der adsorbierten Wirkstoffmenge des Fließmittels auf den Scherwiderstand (80 U/min nach rd. 19 Minuten) und den Sulfatgehalt der Porenlösung (Alter: 10 Minuten) vom Zementleim mit Z01 bzw. Z06; Pfeile kennzeichnen den Scherwiderstand bzw. die adsorbierte Wirkstoffmenge am Sättigungspunkt (SP)

Figure 2: Influence of the quantity of active substance of the superplasticizer adsorbed on the shear resistance (80 rpm after about 19 minutes) and the sulfate content of the pore solution (age: 10 minutes) of cement paste with Z01 and Z06; arrows show shear resistance and quantity of active substance adsorbed at the saturation point (SP)

Die rechte Grafik in Bild 1 zeigt, dass bei Zementleim mit Zement Z06 das Fließmittel FM02 in etwa die gleiche Wirkung aufwies, wie die Fließmittel FM01 und FM03. Der Sättigungspunkt lag bei einer Wirkstoffmenge von rd. 0,15 M.-% v.z. Fließmittel. Der Scherwiderstand wurde bis auf rd. 8 Nmm verringert. Fließmittel FM04 wies bei beiden Zementleimen nur einen geringen verflüssigenden Effekt auf. Die Erhöhung des Anteils an gelöstem Sulfat in der Porenlösung durch Zugabe von Natriumsulfat um 22 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ bzw. 15 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ auf rd. 31 g $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$ Porenlösung führte bei beiden Zementen zu einer geringeren Wirksamkeit des Fließmittels FM01. In beiden Fällen wurde der Sättigungspunkt zu höheren Wirkstoffmengen verschoben. Das ist auf die kompetitive Adsorption zwischen den negativ geladenen Sulfationen und den anionischen PCE-Molekülen zurückzuführen. Bei hohen Gehalten an Sulfat-Ionen stehen den Fließmittelmolekülen weniger Sorptionsplätze auf den positiv geladenen Bereichen der Oberfläche der Zementpartikel zur Verfügung.

In Bild 2 ist die adsorbierte Fließmittelmenge über dem Scherwiderstand sowie der Sulfatgehalt der Porenlösung für Zementleime mit Zement Z01 und Z06 dargestellt. Mit zunehmender adsorbierter Fließmittelmenge nahm der Scherwiderstand der Zementleime ab, im Wesentlichen durch die Verringerung der Fließgrenze.

Im Vergleich zu den anderen Fließmitteln verringerte FM03 den Scherwiderstand von Zementleim mit Z01 im Bereich von rd. 20 bis rd. 40 Nmm trotz geringerer adsorbierter Menge etwas besser. Das ist vermutlich auf die im Vergleich zu FM01 deutlich längeren Seitenketten (SK) von FM03 (FM03: SK=111 PEO; FM01: SK=17 PEO) und deren stärkere abschirmende Wirkung zurückzuführen. Das konnte bei Zementleim mit Zement Z06 nicht festgestellt werden. Bei maximaler Verflüssigung am Sättigungspunkt (SP) waren von FM01, FM02 und FM03 jeweils rd. 1000 ppm Wirkstoff auf der Oberfläche bzw. ersten Hydratationsprodukten von Zement Z01 im Alter von rd. 10 Minuten adsorbiert. Bei Zement Z06 betrug die am Sättigungspunkt adsorbierte Wirkstoffmenge von FM01, FM02 und FM03 zum gleichen Zeitpunkt jeweils rd. 300 ppm. Damit waren bei Zement Z01 bei Dosierung am Sättigungspunkt von FM01 und FM03 rd. 30 %, von FM02 rd. 9 % und bei Zement Z06 von FM01 bis FM03 rd. 20 % adsorbiert.

Von FM04 waren bei der Zugabe von rd. 1,05 M.-% v.z. an Zement Z01 bzw. an Z06 nur rd. 3 % bzw. nur 0,3 % adsorbiert, was die geringe Wirksamkeit dieses Zusatzmittels erklärt. Das war im Wesentlichen auf die geringe Ladungsdichte in Kombination mit den langen Seitenketten von FM04 zurückzuführen. In Bezug auf die Dauer der verflüssigenden Wirkung am Sättigungspunkt ergab sich bei Zementleim mit Z01 die Reihenfolge FM02>FM03>FM01 und bei Zementleim mit Z06 die Reihenfolge FM03>FM01>FM02. Bild 2 zeigt weiterhin, dass der Sulfatgehalt der Porenlösung mit zunehmender Menge an adsorbiertem Fließmittel infolge der kompetitiven Adsorption zwischen Sulfat-Ionen und Fließmittelmolekülen bei Zementleim mit Zement Z01 bzw. Z06 von rd. 11,3 g/l bzw. rd. 14,5 g/l bis zum Sättigungspunkt auf rd. 13,5 g/l bzw. rd. 15,3 g/l anstieg.

Der im Vergleich zu Zementleim mit Z01 höhere Sulfatgehalt in der Porenlösung von Zementleim mit Z06 (rd. 14,5 g/l) trug mit dazu bei, dass generell weniger Fließmittelwirkstoff an der Oberfläche bzw. ersten Hydratationsprodukten von Zement Z06 adsorbierte. Die Molekülstruktur hatte erwartungsgemäß einen wesentlichen Einfluss auf die Adsorptionsgeschwindigkeit, die adsorbierte Menge und somit die Wirkung der untersuchten Fließmittel. Die Fließmittel mit einer hohen Ladungsdichte (FM01 und FM03) waren relativ unabhängig von der Seiten- und Hauptkettenlänge bei beiden Zementen am wirksamsten. Deutliche Unterschiede in der Wirksamkeit traten bei Fließmittel FM02 mit geringerer Ladungsdichte auf, was die Aussagen in [30] bestätigt. Während bei Zementleim mit Z06 das Fließmittel FM02 ähnlich wie FM01 und FM03 wirkte, war bei Zementleim mit Z01 in etwa die dreifache Menge an FM02 notwendig, um den Sättigungspunkt zu erreichen. In Bezug auf die Verflüssigungsdauer wirkte bei Zement Z01 das Fließmittel FM02 und bei Zement Z06 das Fließmittel FM03 am besten.

FM03 compared with FM01 (FM03: SK = 111 PEO; FM01: SK = 17 PEO) and their stronger screening effect. This could not be detected with cement paste made from cement Z06. For the maximum plasticizing effect at the saturation point (SP) about 1000 ppm active substance of FM01, FM02 or FM03 were adsorbed in each case on the surfaces or initial hydration products of cement Z01 after about 10 minutes. With cement Z06 the quantities of FM01, FM02 and FM03 adsorbed at the saturation point at the same time were in each case about 300 ppm. This means that for cement Z01 for the addition level at the saturation point about 30 % of FM01 and FM03 were adsorbed and about 9 % of FM02 were adsorbed, and for cement Z06 about 20 % of FM01 to FM03 were adsorbed.

On the addition of about 1.05 mass % of FM04 w.r.t. cement to cements Z01 or Z06 only about 3 % or 0.3 % respectively were adsorbed, which explains the poor effectiveness of this superplasticizer. This was mainly attributable to the low charge density combined with the long side chains of FM04. As far as the duration of the plasticizing action at the saturation point was concerned the sequence FM02 > FM03 > FM01 was obtained for cement paste made from Z06 and the sequence FM03>FM01>FM02 for cement paste made from Z01. Fig. 2 also shows that for cement pastes made from Z01 or Z06 the sulfate content of the pore solution rises with increasing quantity of adsorbed superplasticizer from about 11.3 g/l or about 14.5 g/l respectively to the saturation point at about 13.5 g/l or about 15.3 g/l respectively as a result of the competitive adsorption between sulfate ions and superplasticizer molecules.

The higher sulfate content in the pore solution of cement paste made from Z06 (about 14.5 g/l) when compared with cement paste made from Z01 contributed to the fact that in general less superplasticizer active substance was adsorbed on the surface or the initial hydration products of cement Z06. The molecular structure had, as expected, a substantial influence on the rate of adsorption and the quantity adsorbed and therefore on the effect of the superplasticizer being investigated. The superplasticizers with high charge densities (FM01 and FM03) were the most effective with both cements relatively independently of the lengths of the side and main chains. Significant differences in the effectiveness occurred with superplasticizer FM02 with a low charge density, which supports the statements in [30]. For cement paste made from Z06 the superplasticizer FM02 had a similar effect to FM01 and FM03 but for cement paste made from Z01 about three times the quantity of FM02 was needed to reach the saturation point. As far as the duration of the plasticizing effect was concerned the superplasticizer FM02 was best with cement Z01 and the superplasticizer FM03 was best with cement Z06.

The results show that the effect of a PCE can vary significantly depending on the composition and properties of the cement. Parameters that primarily influence the reactivity of the cement and the adsorption behaviour of the superplasticizer, such as aluminate content and modification, degree of sulfatization, nature and quantity of the sulfate agent and fineness, generally have a significantly stronger influence on the effect of the superplasticizer than the molecular structure of the PCE itself. The superplasticizer must therefore be matched to the particular application, i.e. to the cement and the concrete technology parameters, such as the time of addition, the mixing time and the fresh concrete temperature, to achieve the optimum plasticizing effect.

6.2 Shear resistance and zeta potential

The zeta potential curves are compared in Fig. 3 with the shear resistance curves from Fig. 1 for cement paste made from cement Z01 (left) and Z06 (right). Cements Z01 and Z06 exhibited zeta potentials of about -17 mV and about -13 mV respectively. The shear resistance fell with increasing quantity of superplasticizer added and the zeta potential was always displaced towards the isoelectric point (0 mV). For cement pastes made from cements Z01 and Z06 the zeta potential at the saturation point when using superplasticizers FM01 to FM03 lay in the ranges from about

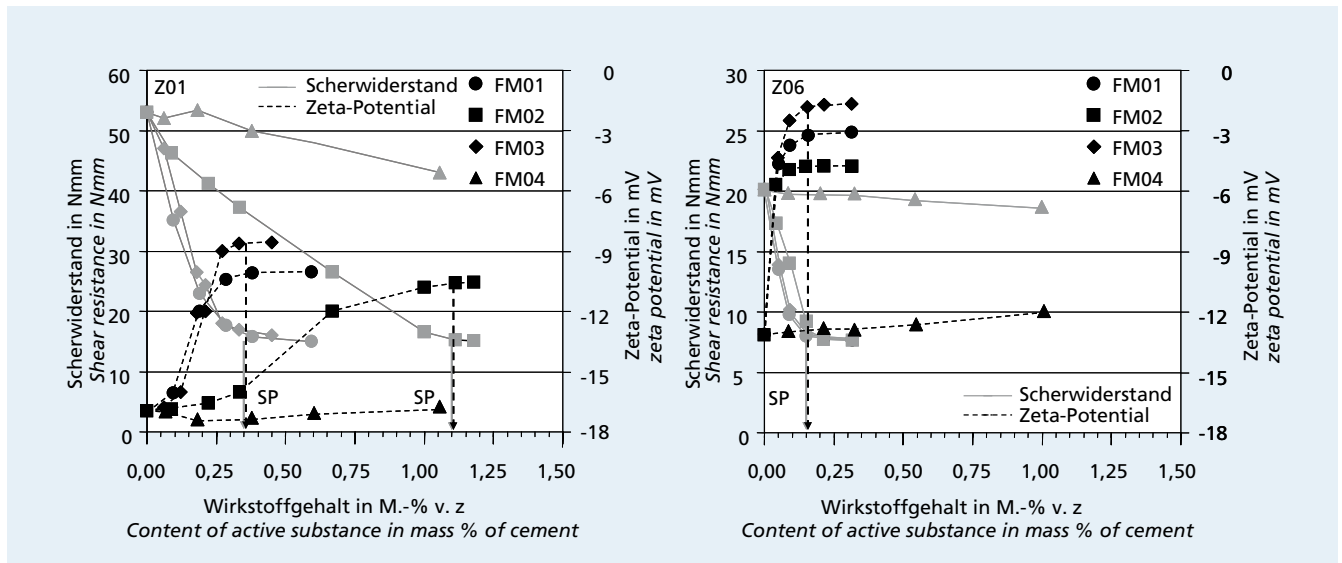


Bild 3: Verlauf des Zeta-Potentials sowie des Scherwiderstands von Zementleim (links: Z01; rechts: Z06, CEM I 42,5 N, w/z = 0,45) im Viskomat (bei 80 U/min nach rd. 19 Minuten) in Abhängigkeit der Molekülstruktur und Zugabemenge von PCE (Wirkstoff); Pfeil kennzeichnet den jeweiligen Sättigungspunkt (SP)

Figure 3: Curves showing the zeta potential and shear resistance of cement pastes (left: Z01; right: Z06, CEM I 42,5 N, w/c = 0.45) in the Viskomat (at 80 rpm after about 19 minutes) as a function of the molecular structure and quantity of the PCE (active substance) added; arrows show the respective saturation points (SP)

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wirkung eines PCE je nach Zementzusammensetzung bzw. -eigenschaften deutlich variieren kann. Parameter, die in erster Linie die Reaktivität der Zemente und das Adsorptionsverhalten der Fließmittel beeinflussen, wie z.B. Aluminatgehalt und -modifikation, Sulfatisierungsgrad, Art und Menge der Sulfatträger sowie Mahlfeinheit beeinflussen die Wirkung des Fließmittels im Allgemeinen deutlich stärker als die Molekülstruktur des PCE selbst. Deshalb muss das Fließmittel auf den jeweiligen Anwendungsfall, d.h. auf den Zement und die betontechnologischen Parameter, wie z.B. den Zugabezeitpunkt, die Mischdauer und die Frischbetontemperatur abgestimmt werden, um eine optimale Verflüssigung zu erreichen.

6.2 Scherwiderstand und Zeta-Potential

In Bild 3 ist der Verlauf des Zeta-Potentials dem Verlauf des Scherwiderstands aus Bild 1 für Zementleim mit Zement Z01 (links) und Z06 (rechts) gegenübergestellt. Zement Z01 bzw. Z06 wies ein Zeta-Potential von rd. -17 mV bzw. rd. -13 mV auf. Mit steigender Zugabemenge an Fließmittel sank der Scherwiderstand und das Zeta-Potential verschob sich stets in Richtung des isoelektrischen Punkts (0 mV). Bei Zementleim mit Zement Z01 bzw. Z06 lag das Zeta-Potential bei Verwendung der Fließmittel FM01 bis FM03 am Sättigungspunkt in einem Bereich von rd. -11 mV bis -8 mV bzw. rd. -5 mV bis -2 mV. Tendenziell verschob das Fließmittel FM03 mit langen Seitenketten (111 PEO) und einer hohen Ladungsdichte ($\text{COO}^-/\text{Ester} = 6$) das Zeta-Potential am deutlichsten in Richtung des isoelektrischen Punkts.

Wie aus Bild 4 rechts, hervorgeht, ist diese Verschiebung des Zeta-Potentials auf die Adsorption der PCE-Moleküle zurückzuführen und kennzeichnet den sterischen Effekt der verwendeten PCE. Dass die Adsorption eines negativ geladenen PCE an der Zementoberfläche zu einer Verschiebung des Zeta-Potentials in die positive Richtung hin zum isoelektrischen Punkt führt [15, 27], ist auf die Seitenketten des PCE zurückzuführen. Die Seitenketten verschieben die Scherebene (Bild 4, rechts, Ψ_1), in der das „Zeta-Potential“ ermittelt wird, von der Partikeloberfläche weg in Richtung der diffusen isoelektrischen Schicht [28, 31]. Vergleicht man in Bild 3 den jeweiligen Verlauf des Scherwiderstands mit dem des Zeta-Potentials, wird deutlich, dass die Kurven in etwa bei

-11 mV to -8 mV and about -5 mV to -2 mV respectively. The superplasticizer FM03 with long side chains (111 PEO) and a high charge density ($\text{COO}^-/\text{ester} = 6$) tended to cause the most significant displacement of the zeta potential in the direction of the isoelectric point.

As can be seen from Fig. 4, right, this displacement of the zeta potential is attributable to the adsorption of the PCE molecules, and characterizes the steric effect of the PCE used. The fact that the adsorption of a negatively charged PCE on the cement surface leads to a displacement of the zeta potential in the positive direction towards the isoelectric point [15, 27] is attributable to the side chains of the PCE. The side chains displace the shear plane (Fig. 4, right, Ψ_1) in which the „zeta potential“ is measured, away from the particle surface in the direction of the diffuse isoelectric layer [28, 31]. When the curve of the shear resistance is compared with the curve of the respective zeta potential in Fig. 3 it is clear that the curves exhibit breaks at about the same active substance content and the respective saturation points are virtually identical (see arrows).

The quantity of active substance adsorbed, the zeta potential and the shear resistance correlate with one another. It is clear from Fig. 3 that the saturation point can be determined both via the shear resistance, e.g. with a viscomat, and via the determination of the zeta potential.

6.3 Influence of granulated blastfurnace slag and limestone on the zeta potential of cement paste with and without superplasticizer

In order to be able to assess the influence of granulated blastfurnace slag and limestone on the zeta potential of cement pastes the zeta potentials of these substances were determined in de-ionized water and in the pore solution of cement Z01. The use of pore solution as the dispersing agent makes it possible to measure the zeta potential of granulated blastfurnace slag and limestone under the conditions that prevail in cement paste (pH value, composition of the solution). The results of the table in Fig. 5 (see also Table 1) show that the zeta potentials of the granulated blastfurnace slags and the limestones were basically negative in the pore solution; for limestone LL1 and granulated blastfurnace slag S1 they differed significantly from the zeta potentials

dem gleichen Wirkstoffgehalt einen Knickpunkt aufweisen und der jeweilige Sättigungspunkt nahezu identisch ist (s. Pfeile).

Die adsorbierte Wirkstoffmenge, das Zeta-Potential und der Scherwiderstand korrelierten miteinander. Aus Bild 3 geht hervor, dass der Sättigungspunkt sowohl über den Scherwiderstand, z.B. mit dem Viskomat, als auch über die Bestimmung des Zeta-Potentials ermittelt werden kann.

6.3 Einfluss von Hüttensand und Kalkstein auf das Zeta-Potential von Zementleim ohne und mit Fließmittel

Um den Einfluss von Hüttensand und Kalkstein auf das Zeta-Potential von Zementleimen beurteilen zu können, wurde das Zeta-Potential dieser Stoffe in deionisiertem Wasser sowie in Porenlösung des Zements Z01 ermittelt. Die Verwendung von Porenlösung als Dispergiertmittel ermöglicht die Messung des Zeta-Potentials von Hüttensand und Kalkstein unter Bedingungen, wie sie im Zementleim vorliegen (pH-Wert, Lösungszusammensetzung). Die Ergebnisse in der Tabelle in Bild 5 (s. auch Tafel 1) zeigen, dass das Zeta-Potential der Hüttensande und Kalksteine in Porenlösung grundsätzlich negativ war und sich bei Kalkstein LL1 und Hüttensand S1 von dem in Wasser ermittelten Zeta-Potential deutlich unterschied. Untersuchungen der Porenlösung zeigten, dass das überwiegend auf die Adsorption von Sulfat-Ionen aus der Porenlösung an positiv geladenen Bereichen von Hüttensand bzw. Kalkstein zurückzuführen war. Kalkstein LL2 wies tonige Bestandteile auf, die die hohe BET-Oberfläche und das negative Zeta-Potential in Wasser erklären. Bei Kalkstein LL2 und Hüttensand S2 unterschied sich das Zeta-Potential in Wasser bzw. Porenlösung nicht wesentlich.

Weiterhin ist in Bild 5 der Einfluss des Anteils an Hüttensand (S1, S2) und Kalkstein (LL1, LL2) auf das Zeta-Potential von Leimen damit hergestellter Laborzemente mit gleicher Portlandzementklinkerkomponente (Z01) dargestellt. Das Zeta-Potential des Leims aus Portlandzement Z01 ohne weitere Hauptbestandteile neben Klinker betrug rd. -17 mV. Bis zu einem Hüttensand-anteil von 35 M.-% S1 bzw. S2 veränderten sich das Zeta-Potential sowie der Scherwiderstand der hüttensandhaltigen Zementleime im Vergleich zum Leim mit Portlandzement kaum. Eine weitere

gemessene in Wasser. Investigations with the pore solution showed that this was attributable predominantly to the adsorption of sulfate ions from the pore solution on positively charged areas of granulated blastfurnace slag or limestone. Limestone LL2 had argillaceous constituents, which explain the high BET surface area and the negative zeta potential in water. With limestone LL2 and granulated blastfurnace slag S2 there is no substantial difference between the zeta potentials in water and in pore solution.

Fig. 5 also shows the influence of the proportion of granulated blastfurnace slag (S1, S2) and limestone (LL1, LL2) on the zeta potential of pastes from laboratory cements produced with them with the same cement clinker component (Z01). The zeta potential of the paste produced from Portland cement Z01 without any other main constituents apart from clinker was about -17 mV. Up to a granulated blastfurnace slag content of 35 mass % of S1 or S2 the zeta potential and shear resistance of the cement pastes containing granulated blastfurnace slag hardly differed from those of the paste made from Portland cement. Any further increase in the proportion of granulated blastfurnace slag led to a significant decrease in the zeta potential in the direction of the isoelectric point (0 mV) and in the shear resistance of the cement pastes. The lowering of the zeta potential can be explained by the decrease in the proportion of sulfate ions in the pore solution that accompanies the reduction in the proportion of Portland cement clinker and by the simultaneous increase in specific surface area due to the increase in the proportion of granulated blastfurnace slag. With a high granulated blastfurnace slag content and a correspondingly low clinker fraction there are fewer sulfate ions available for adsorption on the surface of the respective granulated blastfurnace slag.

The limestones affected the zeta potential of the cement paste significantly more strongly than the granulated blastfurnace slags that were investigated. For both limestones the change in the zeta potential took place in accordance with the respective zeta potentials measured in the pore solution (LL1 = -8 mV; LL2 = -33 mV). Limestone LL1 did not cause any substantial change in the shear resistance but the shear resistance (yield value and dynamic viscosity) increased with increasing proportion of limestone LL2.

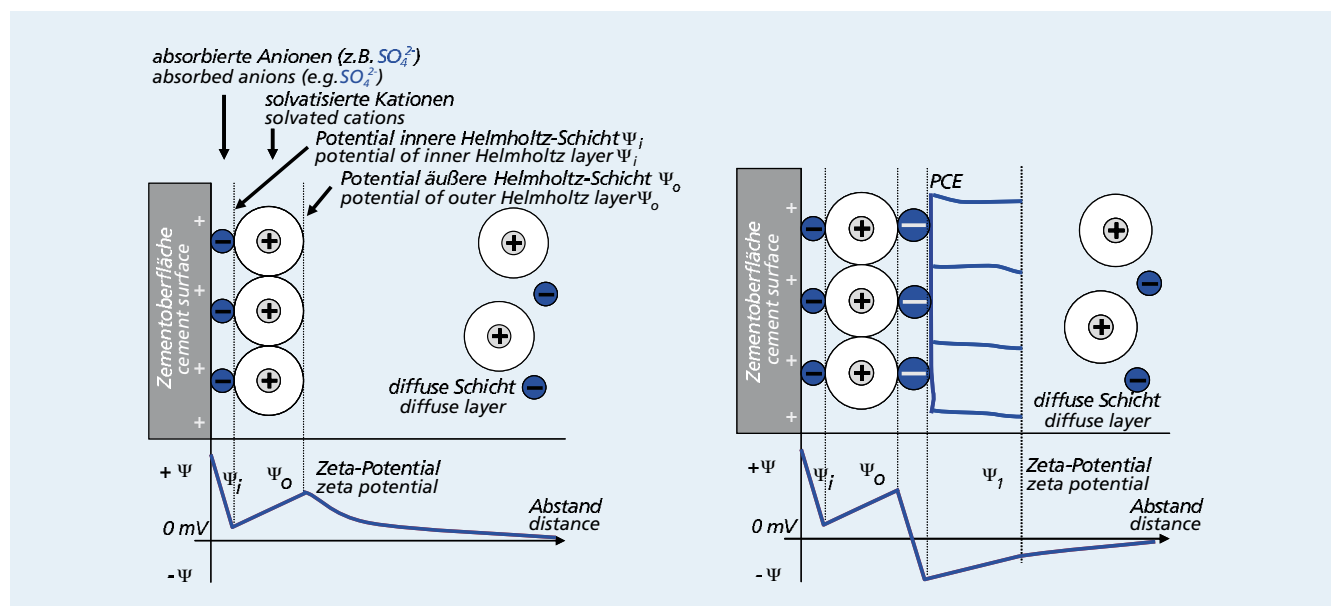


Bild 4: Schematische Darstellung der elektrischen Doppelschicht und des Potentialverlaufs an der fest/flüssig Grenzphase eines positiv geladenen Bereichs eines Zementteilchens; links: ohne Fließmittel; rechts: mit adsorbiertem PCE-Molekül; Seitenketten verschieben die Scherebene in Richtung der diffusen Schicht

Figure 4: Diagram showing the electric double layer and the potential curve at the solid/liquid boundary phase of a positively charged part of a cement particle; left: without plasticizer; right: with adsorbed PCE molecule; side chains displace the shear plane in the direction of the diffuse layer

re Erhöhung des Hüttensandanteils führte zu einer deutlichen Absenkung des Zeta-Potentials in Richtung des isoelektrischen Punkts (0 mV) und des Scherwiderstands der Zementleime. Die Absenkung des Zeta-Potentials kann mit der durch die Verringerung des Portlandzementklinkeranteils einhergehenden Abnahme des Anteils an Sulfat-Ionen in der Porenlösung und der gleichzeitigen Zunahme der spezifischen Oberfläche durch die Erhöhung des Anteils an Hüttensand erklärt werden. Bei hohem Hüttensandgehalt und entsprechend geringem Klinkeranteil stehen weniger Sulfat-Ionen zur Adsorption auf der Oberfläche des jeweiligen Hüttensands zur Verfügung.

Die Kalksteine beeinflussten das Zeta-Potential von Zementleim deutlich stärker als die untersuchten Hüttensande. Dabei verlief die Änderung des Zeta-Potentials bei beiden Kalksteinen entsprechend dem jeweils in der Porenlösung ermittelten Zeta-Potentials (LL1 = -8 mV; LL2 = -33 mV). Während Kalkstein LL1 zu keiner wesentlichen Änderung des Scherwiderstands führte, wurde durch Kalkstein LL2 mit zunehmendem Anteil der Scherwiderstand (Fließgrenze und dyn. Viskosität) erhöht. Das kann auf die hohe spezifische Oberfläche von LL2 sowie auf die Bildung von Agglomeraten durch die Verbrückung von durch tonige Bestandteile negativ geladenen Kalksteinoberflächen durch z.B. Calcium-Ionen zurückzuführen sein.

In Bild 6 ist der Verlauf des Zeta-Potentials von Leimen der Laborzemente mit 35 M.-% LL1 oder LL2 bzw. 35 M.-% und 65 M.-% S1 in Abhängigkeit der Wirkstoffmenge von Fließmittel FM05 (PCE) dargestellt. Das Zeta-Potential des Leims mit Zement mit 35 M.-% S1 bzw. 35 M.-% LL1 wurde bereits durch die Adsorption geringer Mengen an Fließmittel in gleicher Weise wie auch beim Zement ohne weitere Hauptbestandteile deutlich reduziert. Das Zeta-Potential des Leims mit Zement mit 65 M.-% S1 wurde durch die Zugabe des Fließmittels nur geringfügig beeinflusst, d.h. nur wenig Fließmittel adsorbierte. Der Verlauf des jeweiligen Zeta-Potentials zeigt, dass bei den Leimen mit Zementen mit S1 und LL1 der Sättigungspunkt jeweils bei einer geringeren Wirkstoffmenge eintrat als bei dem verwendeten Portlandzement.

Das Zeta-Potential und der Scherwiderstand des Leims mit 35 M.-% LL2 änderten sich bis zu einer Wirkstoffmenge von rd.

This can be attributed to the high specific surface area of LL2 and to the formation of agglomerates due to the bridging (by, for example, calcium ions) of the limestone surface that is negatively charged due to argillaceous components.

Fig. 6 shows the curves of the zeta potential of pastes made from laboratory cements containing 35 mass % LL1 or LL2 and 35 mass % or 65 mass % S1 as a function of the quantity of active substance of superplasticizer FM05 (PCE). The zeta potential of the paste made from cement containing 35 mass % S1 or 35 mass % LL1 was significantly reduced by the adsorption of small quantities of superplasticizer in the same way as for the cement without other main constituents. The zeta potential of the paste made from cement containing 65 mass % S1 was only slightly affected by the addition of superplasticizer, i.e. very little superplasticizer was adsorbed. The curve of the respective zeta potential shows that for the pastes made from cements containing S1 and LL1 the saturation point occurred in each case at a lower quantity of active substance than with the Portland cement used.

The zeta potential and shear resistance of the paste made with 35 mass % LL2 changed only slightly up to a quantity of active substance of about 0.1 mass % w.r.t. cement. Only at higher addition levels did the adsorption lead to the development of the steric effect and to appreciable breakdown of the agglomerate structure [see also 32]. This was associated with significant displacement of the zeta potential towards the isoelectric point and a plasticizing effect. The pastes made from cements containing LL2 exhibited very high stability (low tendency to bleeding) when compared with the other pastes at the water/cement ratio investigated. The extent to which the PCE molecules are adsorbed on the limestone, granulated blastfurnace slag and clinker in the cement is currently being investigated.

Examination of limestone and granulated blastfurnace slag in pore solutions showed that sulfate ions, among other things, are adsorbed on granulated blastfurnace slag and limestone, so that competitive adsorption between sulfate ions and superplasticizer molecules can also be expected with these components. Many of the investigations described so far in the literature relating to adsorption with superplasticizers on limestone and granulated blastfurnace slag

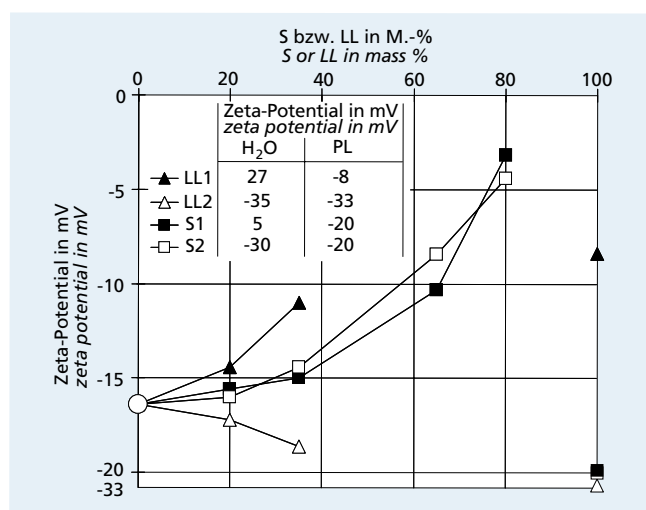


Bild 5: Zeta-Potential von Leimen aus Laborzementen mit gleicher Klinkerkomponente (Z01) und steigendem Anteil verschiedener Hüttensande (S1, S2) und Kalksteine (LL1, LL2); Tabelle: Zeta-Potential in deion. Wasser (H₂O) und Porenlösung (PL)
Figure 5: Zeta potential of pastes made from laboratory cements with the same clinker component (Z01) and rising proportion of different granulated blastfurnace slags (S1, S2) and limestones (LL1, LL2); Table: zeta potential in deionized water (H₂O) and pore solution (PL)

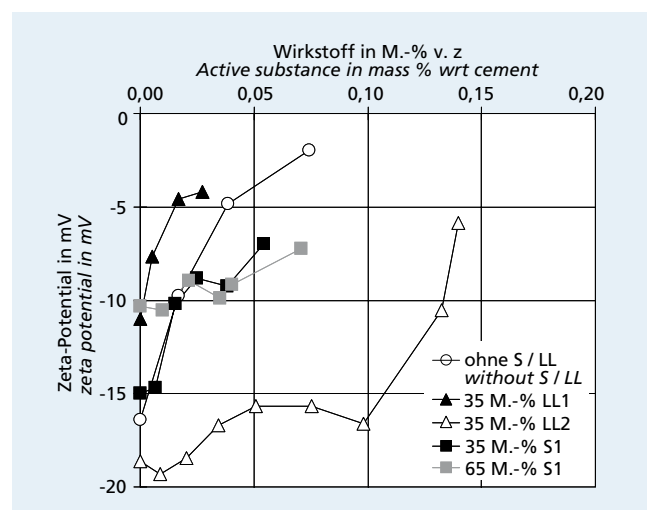


Bild 6: Zeta-Potential von Leimen aus Laborzementen mit gleicher Klinkerkomponente (Z01) und 35 M.-% LL1, LL2 bzw. 35 und 65 M.-% S1 in Abhängigkeit der Wirkstoffmenge von PCE-Fließmittel FM05
Figure 6: Zeta potential of pastes made from laboratory cements with the same clinker component (Z01) and 35 mass % LL1, LL2 or 35 and 65 mass % S1 as a function of the quantity of active substance of the PCE superplasticiser FM05

0,1 M.-% v. z. nur geringfügig. Erst bei höheren Zugabemengen führte die Adsorption zur Ausbildung des sterischen Effekts und zu einer merklichen Auflösung der Agglomeratstruktur [s. auch 32]. Das war mit einer deutlichen Verschiebung des Zeta-Potentials in Richtung des isoelektrischen Punkts sowie einer verflüssigenden Wirkung verbunden. Die Leime mit Zementen mit LL2 wiesen im Vergleich zu den anderen Leimen bei dem untersuchten Wasserzementwert eine sehr hohe Stabilität (geringe Blutneigung) auf. Zu welchen Anteilen die PCE-Moleküle am Kalkstein, Hüttensand bzw. Klinker im Zement adsorbierten, wird derzeit untersucht.

Untersuchungen von Kalksteinen und Hüttensanden in Porenlösung zeigten, dass an Hüttensand und Kalkstein u.a. Sulfat-Ionen adsorbierten, sodass auch bei diesen Komponenten eine kompetitive Adsorption zwischen Sulfat-Ionen und Fließmittelmolekülen zu erwarten ist. Viele bislang in der Literatur vorgestellte Adsorptionsuntersuchungen mit Fließmitteln an Kalksteinen und Hüttensanden, die in Wasser bzw. alkalischen Lösungen ohne Sulfat-Ionen durchgeführt wurden, sind bezüglich der Übertragbarkeit auf die Adsorptionsvorgänge im Zement deshalb neu zu bewerten.

7 Zusammenfassung

PCE mit einer hohen Ladungsdichte (FM01 und FM03) waren relativ unabhängig von der Seiten- und Hauptkettenlänge bei beiden untersuchten Zementen in Bezug auf das Erreichen des Sättigungspunkts am wirksamsten. FM02 mit niedriger Ladungsdichte und kurzer Hauptkette war bei Zement Z01 weniger wirksam als bei Zement Z06, wo es wie die beiden Fließmittel FM01 und FM03 wirkte. Ein Einfluss der langen Seitenketten von FM03 auf die Adsorption wurde nur bei Zement Z01 festgestellt. FM04 mit geringer Ladungsdichte und langen Seitenketten adsorbierte nur unwesentlich an den untersuchten Zementen und verflüssigte nur geringfügig. In Bezug auf die Dauer der verflüssigenden Wirkung am Sättigungspunkt ergab sich bei Zementleim mit Z01 die Reihenfolge FM02>FM03>FM01 und bei Zementleim mit Z06 die Reihenfolge FM03>FM01>FM02.

Die adsorbierte Wirkstoffmenge, das Zeta-Potential und der Scherwiderstand korrelierten miteinander. Mit steigender Zugabemenge an Fließmittel sank der Scherwiderstand und das Zeta-Potential verschob sich aufgrund der durch die Adsorption der PCE hervorgerufenen Verschiebung der Scherebene in Richtung des isoelektrischen Punkts (0 mV). Der Sättigungspunkt konnte sowohl anhand rheologischer Messungen über den Scherwiderstand als auch über die Bestimmung des Zeta-Potentials ermittelt werden.

Die Verwendung von Porenlösung als Dispergiermittel ermöglicht die Messung des Zeta-Potentials von Kalkstein und Hüttensand unter Bedingungen, wie sie im Zementleim vorliegen (pH-Wert, Lösungszusammensetzung). Das Zeta-Potential der Hüttensande und Kalksteine in Porenlösung war grundsätzlich negativ und unterschied sich teilweise erheblich von dem Zeta-Potential in Wasser. Das war überwiegend auf die Adsorption von Sulfat-Ionen aus der Porenlösung an positiv geladenen Bereichen der Kalksteine bzw. Hüttensande zurückzuführen. Tonige Bestandteile in Kalkstein LL2 führten zu einem negativen Zeta-Potential in Wasser.

Die Erhöhung des Hüttensandanteils (S1, S2) führte zu einer deutlichen Absenkung des Scherwiderstands der Zementleime und zur Verschiebung des Zeta-Potentials in Richtung des isoelektrischen Punkts (0 mV). Die Kalksteine (LL1, LL2) beeinflussten den Scherwiderstand sowie das Zeta-Potential von Zementleim unterschiedlich und deutlich stärker als die untersuchten Hüttensande. Im Gegensatz zum Leim mit 35 M.-% LL2 trat bei Zementleimen mit S1 und LL1 der Sättigungspunkt jeweils bei einer geringeren Wirkstoffmenge ein als beim Leim mit Portlandzement (Z01). Das Zeta-Potential des Leims mit Zement mit 65 M.-% S1 wurde durch die Zugabe des Fließmittels nur geringfügig beeinflusst, d.h. nur wenig Fließmittel adsorbierte.

Trotz identischer Molekülstruktur von PCE kann die Wirkung je nach Zement deutlich variieren. Deshalb muss das Fließmittel im Wesentlichen auf die C₃A-Reaktivität und den Sulfatgehalt der

that were carried out in water or alkaline solutions without sulfate ions should therefore be re-evaluated with respect to their applicability to the adsorption processes occurring in cement.

7 Final comments

For the two cements investigated the PCEs with high charge densities (FM01 and FM03) were relatively independent of the lengths of the side and main chains with respect to reaching the saturation point most effectively. FM02 with a low charge density and short main chain was less effective with cement Z01 than with cement Z06, where it acted in the same way as the two plasticizers FM01 and FM03. Any influence of the long side chains of FM03 on the adsorption was found only with cement Z01. FM04 with a low charge density and long side chains was only adsorbed to an insignificant extent on the cements investigated and had only a slight plasticizing effect. With respect to the duration of the plasticizing effect at the saturation point the sequence FM02>FM03>FM01 was obtained with the cement paste made with Z01 and the sequence FM03>FM01>FM02 with the cement paste made with Z06.

There was a correlation between the quantity of adsorbed active substance, the zeta potential and the shear resistance. With increasing quantity of added plasticizer the shear resistance fell and the zeta potential was displaced in the direction of the isoelectric point (0 mV) because of the displacement of the shear plane caused by adsorption of the PCE. The saturation point was determined both with the aid of rheological measurements of the shear resistance and by determining the zeta potential.

The use of pore solution as the dispersing agent made it possible to measure the zeta potential of limestone and granulated blastfurnace slag under conditions like those present in cement paste (pH, composition of the solution). The zeta potentials of the granulated blastfurnace slags and limestones in the pore solution were basically negative and in some cases differed substantially from the zeta potentials in water. This was mainly attributable to the adsorption of sulfate ions from the pore solution on positively charged areas of the limestone or granulated blastfurnace slag. Argillaceous constituents in limestone LL2 led to a negative zeta potential in water.

Increasing the proportion of granulated blastfurnace slag (S1, S2) led to a significant drop in the shear resistance of the cement pastes and to displacement of the zeta potential in the direction of the isoelectric point (0 mV). The limestones (LL1, LL2) affected the shear resistance and the zeta potential of the cement paste to different extents and significantly more strongly than the granulated blastfurnace slags investigated. In contrast to the paste with 35 mass % LL2 the saturation points with cement pastes containing S1 and LL1 occurred in each case with a smaller quantity of active substance than with the paste made with Portland cement (Z01). The zeta potential of the paste made with cement containing 65 mass % S1 was affected only slightly by the addition of the plasticizer, i.e. only very little plasticizer was adsorbed.

In spite of identical molecular structures of the PCEs the effect can vary significantly depending on the cement. To achieve the optimum plasticizing effect it is therefore important that the plasticizer is matched to the C₃A reactivity and the sulfate content of the pore solution of the particular cement and to the concrete technology parameters, such as the time of addition, the mixing time and the fresh concrete temperature. The PCE plasticizers provide the concrete technologists with an efficient admixture that permits optimum matching to the particular application due to their changeable molecular structure. The investigations have widened the current understanding of the effect of PCE-based plasticizers on the rheology and the zeta potential of pastes made with Portland cement and with cements containing varying proportions of granulated blastfurnace slag or limestone.

This should help the concrete technologists to estimate in advance the interactions to be expected in the concretes that they have designed and therefore to reduce the risk of the occurrence of unwanted reactions in the fresh concrete, such as uncontrolled stiffening, a secondary plasticizing effect or severe bleeding.

Porenlösung des jeweiligen Zements sowie die betontechnologischen Parameter, wie z.B. den Zugabezeitpunkt, die Mischzeit und die Frischbetontemperatur abgestimmt werden, um eine optimale Verflüssigung zu erreichen. Mit den PCE-Fließmitteln stehen dem Betontechnologen leistungsfähige Zusatzmittel zur Verfügung, deren veränderbare Molekülstruktur eine optimale Anpassung an den jeweiligen Einsatz ermöglicht. Die Untersuchungen erweitern den Kenntnisstand über die Wirkung von Fließmitteln auf der Basis von PCE auf die Rheologie und das Zeta-Potential von Leimen aus Portlandzement sowie Zementen mit unterschiedlichen Anteilen an Hüttensand oder Kalkstein.

Das soll dem Betontechnologen helfen, im Vorfeld abzuschätzen, welche Wechselwirkungen in dem von ihm geplanten Beton zu erwarten sind und somit das Risiko des Auftretens unerwünschter Reaktionen im Frischbeton, wie z.B. unkontrolliertes Ansteifen oder Nachverflüssigen bzw. starkes Wasserabsondern zu vermindern.

Danksagung

Die Forschung wurde teilweise aus Haushaltsmitteln des damaligen Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert (AiF-Nr.: 14006 N).

Literatur / Literature

- [1] Müller, C.; Severins, K.; Hauer, B.: Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche. *beton* 59 (2009) No. 10, pp. 469–478 und No. 11, pp. 531–537
- [2] Müller, C.; Severins, K.: Möglichkeiten und Grenzen in der Anwendung von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche. 17. Internationale Baustofftagung, 23.–26. September 2009, Weimar: Tagungsbericht, Band 1, 2; Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.), 2009, pp. 2-0365–2-0370
- [3] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.): Zement-Taschenbuch. 51. Ausgabe, Verlag Bau und Technik, Duesseldorf 2008
- [4] Aitcin, P.-C.; Jolicoeur, C.; MacGregor, J. G.: Superplasticizers: How they work and why they occasionally don't. *Concrete International* 5 (1994), pp. 45–52
- [5] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. *beton* 45 (1995), No. 11, pp. 802–808 und No. 12, pp. 876–881
- [6] Uchikawa, H.; Hanehara, S.; Sawaki, D.: Effect of electrostatic and steric repulsive forces of organic admixtures on the dispersion of cement particles in fresh cement paste. 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Göteborg, 1997, Vol. III, paper 3iii001
- [7] Jolicoeur, C.; Simard, M.-A.: Chemical admixture-cement interactions: Phenomenology and physio-chemical concepts *Cement and Concrete Composites* (1998), pp. 87–101
- [8] Flatt, R. J.: Interparticle Forces and Superplasticizers in Cement Suspensions: Thèse No 2040 (1999). Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL; Département de Matériaux, 1999
- [9] Ohta, A.; Sugiyama, T.; Uomoto, T.: Study of Dispersing Effects of Polycarboxylate-Based Dispersant on Fine Particle. *Proceedings 6th CANMET/ACI Int'l Conference Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (2000), pp. 211–227
- [10] Perez, J.-P.; Sabio, S.; Pellerin, B.; Gartner, E.: Solution composition in equilibrium with portlandite and gypsum at 20 °C and 30 °C in the presence of alkalis and superplasticizers. Sixth CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete, Nizza, 2000, pp. 299–311
- [11] Yamada, K.; Ogawa, S.; Hanehara, S.: Working mechanism of poly-beta-naphthalene sulfonate and polycarboxylate superplasticizer types from the point of cement characteristics. *Journal of Research of the Taiheiyō Cement Corporation* (2000) 139, pp. 3–13
- [12] Yamada, K.; Takahashi, T.; Hanehara, S.; Matsuhisa, M.: Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizers. *Cem. and Concr. Res.* 30 (2000), pp. 197–207
- [13] Yamada, K.; Ogawa, S.; Hanehara, S.: Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizers by sulfate ion concentration in aqueous phase. *Cem. and Concr. Res.* 31 (2001), pp. 375–383
- [14] Sakai, E.; Atarashi, D.; Kawakami, A.; Daimon, M.: Influence of molecular structure of comb-type superplasticizers and inorganic electrolytes on the dispersion mechanisms of limestone powder In: Malhotra, V.M. (Ed.): Seventh CANMET/ACI International conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Farmington Hills, ACI, 2003 (ACI Publication SP 217), pp. 381–392
- [15] Plank, J.; Hirsch, C.: Superplasticizer adsorption on synthetic ettringite. In: Malhotra, V.M. (Ed.): Seventh CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute, ACI, 2003 (ACI Publication SP 217), 2003, pp. 283–297
- [16] Hirsch, C. M.: Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation. Dissertation, TU-München 2005
- [17] Plank, J.; Bassioni, G.; Dai, Z.; Keller, H.; Sachsenhauser, B.; Zouaoui, N.: Neues zur Wechselwirkung zwischen Zementen und Polycarboxylat-Fließmitteln. 16. Internationale Baustofftagung ibausil 2006, Band 1, Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar 2006, pp. 1–579 – 1–598
- [18] Rößler, C.: Hydratation, Fließfähigkeit und Festigkeitsentwicklung von Portlandzement: Einfluss von Fließmitteln, Alkalisulfaten und des Abbinde-reglers. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar 2006
- [19] Weigl, J.: Elektrokinetische Grenzflächenvorgänge. Verlag Chemie, Weinheim, New York 1977
- [20] Nägele, E.: The Zeta-potential of cement *Cem. and Concr. Res.* 15 (1985) 3, pp. 453–462
- [21] Nägele, E.: The zeta-potential of cement: Part II: Effect of pH-value. *Cem. and Concr. Res.* 16 (1986) 6, pp. 853–863
- [22] Nägele, E.: The zeta-potential of cement: Part III: The non-equilibrium double layer on cement. *Cem. and Concr. Res.* 17 (1987) 4, pp. 573–580
- [23] Nägele, E.; Schneider, U.: The Zeta - Potential of Cement: Part IV: Effect of simple salts. *Cem. and Concr. Res.* 17 (1987) 6, pp. 977–982
- [24] Nägele, E.; Schneider, U.: The zeta-potential of cement Part V: Effect of surfactants. *Cem. and Concr. Res.* 18 (1988) 2, pp. 257–264
- [25] Nägele, E.; Schneider, U.: Das Zeta-Potential mineralischer Baustoffe – Theorie, Eigenschaften und Anwendungen In: TIZ International 112 (1988) 7, pp. 458–467
- [26] Flatt, R. J.; Ferraris, C. F.: Acoustophoretic characterization of cement suspensions. *Materials and Structures* 35 (2002) 253, pp. 541–547
- [27] Blask, O.; Honert, D.: The electrostatic potential of highly filled cement suspensions containing various superplasticizers. In: Malhotra, V.M. (Ed.): Seventh CANMET/ACI international conference on superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. Farmington Hills, ACI, 2003 (ACI Publication SP 217), pp. 87–101
- [28] Plank, J.; Vlad, D.; Brandl, A.; Chatziagorastou, P.: Kolloidchemische Untersuchungen zum sterischen Effekt von Polycarboxylat-Fließmitteln. *Cement International* 3 (2005) No. 2, pp. 101–110
- [29] Dukhin, A. S.; Goetz, P. J.: *Ultrasound for Characterizing Colloids*, Elsevier Science, New York 2002
- [30] Ludwig, H.-M.; Neumann, T.: Zur Wechselwirkung von Zementen mit der neuen Fließmittelgeneration auf PCE-Basis. 16. Internationale Baustofftagung ibausil 2006, CD-ROM, Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar 2006
- [31] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ; Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 2003–2005, Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ: Verlag Bau u. Technik 2005
- [32] Dietermann, M.; Hauschild, I.: Einfluss von Zementparametern auf das Zusammenwirken von Zement und Fließmittel. 16. Internationale Baustofftagung ibausil 2006, Band 1, Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar 2006, pp. 1–631 – 1–638
- [33] Nägele, E.; Schneider, U.: The zeta-potential of blast furnace slag and fly ash. *Cem. and Concr. Res.* 19 (1989) 5, pp. 811–820
- [34] Drissen, P.: Glasgehaltbestimmung von Hüttensand. *ZKG* 47 (1994) No. 11, pp. 658–661

Acknowledgement

The research was partially supported by funds from the former BMWA (Federal Ministry for Economic Affairs and Labour) through the “Otto von Guericke” Federation of Industrial Research Associations (AiF No. 14006 N).

Eberhard Eickschen, Düsseldorf

Nachaktivierungspotenzial Luftporen bildender Betonzusatzmittel

Reactivation potential of air-entraining concrete admixtures

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde bei einigen Betondeckenlosen insbesondere beim Einbau im Sommer bei Verwendung von Luftporenbildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein stark erhöhter Luftporengehalt im Festbeton festgestellt. Erste Untersuchungsergebnisse des Forschungsinstituts der Zementindustrie (FIZ) mit Straßenbetonen und handelsüblichen LP-Bildnern zeigten, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts immer dann auftritt, wenn der LP-Bildner im Frischbeton infolge einer zu kurzen Mischdauer bei der Herstellung überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt zu erreichen [1–4]. Der Frischbeton enthält dann wirkstoffabhängig nicht ausreichend aufgeschlossenen und aktivierten LP-Bildner. Bei einem Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton kann sich in diesem Fall der Luftgehalt nachträglich erhöhen. Der Einfluss des Luftporen bildenden Zusatzmittels auf das Ausmaß dieses Anstiegs, das Nachaktivierungspotenzial, konnte jedoch nicht genau ermittelt werden. Die Versuchsergebnisse an Zementleimen, Mörteln und Betonen wurden nunmehr in ein Modell zusammengeführt, das die Auswirkungen von Mischdauer, Wirkstoffart und Zugabemenge der Luftporen bildenden Wirkstoffe auf das Nachaktivierungspotenzial erklärt [5].

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Rohstoffe und Wirkungsweise der LP-Bildner

Zur Erzielung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands müssen dem Beton LP-Bildner zugegeben werden, die im Frischbeton viele kleine gleichmäßig verteilte Luftporen mit einem Durchmesser $\leq 300 \mu\text{m}$ erzeugen. Der Gehalt an kleinen Poren wird mit der Bestimmung des Mikro-Luftporengehaltes (Gehalt aller Poren bis zu einem Durchmesser von $300 \mu\text{m}$) und des Abstandsfaktors am Festbeton beurteilt. Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins zur nächsten Luftpore. Um einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand von Beton zu gewährleisten, muss in der Erstprüfung der Gehalt an Mikro-Luftporen mindestens 1,8 Vol.-% betragen. Der Abstandsfaktor darf 0,20 mm nicht überschreiten [6].

Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass für den Nachweis eines ausreichenden Gehalts an kleinen Poren bei Verwendung eines geeigneten LP-Bildners die Einhaltung eines festgelegten Gesamtluftgehalts des Frischbetons im Allgemeinen genügt. Fahrbahndeckenbeton, der im Winter stark mit Tausalz beaufschlagt wird, muss als LP-Beton hergestellt werden. Als Grundstoffe für LP-Bildner haben sich Seifen aus natürlichen Harzen (Wurzelharze) bewährt. In den vergangenen Jahren wurden vermehrt synthetische LP-Bildner eingesetzt, wobei als Rohstoffe im wesentlichen Alkylpolyglycoethersulfate und Alkylsulfate bzw. -sulfonate verwendet werden [7–9].

LP-Bildner gehören zu den grenzflächenaktiven Substanzen, den so genannten Tensiden. Die gemeinsame Charakteristik der Tenside ist ihr hydrophob/hydrophiler Molekülaufbau. Sie bestehen aus einer unpolaren hydrophoben verzweigten oder unverzweigten Kohlenwasserstoffkette mit acht bis zwölf Kohlenstoffatomen und

1 Introduction

A greatly increased air void content in the hardened concrete has been found in recent years in some contract sections of concrete pavement, especially when they have been placed in summer with the use of air-entraining agents based on synthetic active substances. Initial test results from the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) with paving concretes and commercially available air-entraining agents have shown that a substantial increase in the air content always occurs if, to achieve the required air content, excess air-entraining agent has been added to the fresh concrete because of an excessively short mixing time during production [1–4]. Depending on the active substance the fresh concrete may then not contain sufficient air-entraining agent that has been digested and activated. In this case there may be a subsequent increase in air content when mixing energy is introduced into the fresh concrete. However, it was not possible to make an accurate determination of the influence of the air-entraining admixture on the extent of this increase – the reactivation potential. The test results on cement pastes, mortars and concretes were then combined in a model that explains the effects of mixing time, type of active substance and addition level of the air-entraining active substances on the reactivation potential [5].

2 Current state of knowledge

2.1 Raw materials and mode of operation of the air-entraining agents

Air-entraining agents that generate large numbers of small, evenly distributed, air voids with diameters $\leq 300 \mu\text{m}$ in the fresh concrete must be added to the concrete to achieve adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt. The content of small voids is assessed by determining the micro air void content (content of all voids up to a diameter of $300 \mu\text{m}$) and the spacing factor in the hardened concrete. The spacing factor is a parameter derived from an idealized void system for the distance of a point in the hardened cement paste from the nearest air void. To ensure adequate resistance of the concrete to freeze-thaw with de-icing salt the content of micro air voids in the initial testing must be at least 1.8 vol. %. The spacing factor must not exceed 0.20 mm [6].

Extensive investigations have shown that to demonstrate an adequate content of small voids when using a suitable air-entraining agent it is generally sufficient to comply with a stipulated total air content in the fresh concrete. Pavement concrete that in winter is heavily exposed to de-icing salt must be produced as air-entrained concrete. Soaps made from natural resins (wood resins) have proved successful as the basic materials for air-entraining agents. Synthetic air-entraining agents have been used increasingly in recent years; the raw materials used are essentially alkylpolyglycol ether sulfates and alkyl sulfates or sulfonates [7–9].

Air-entraining agents belong to the class of surface-active substances, known as tensides. The common characteristic of tensides is their hydrophobic/hydrophilic molecular structure. They consist of a non-polar hydrophobic branched or unbranched hydrocarbon

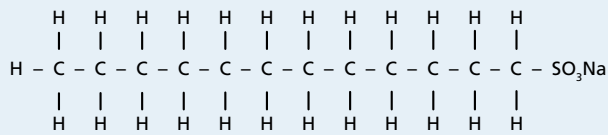


Bild 1: Beispiel für ein synthetisches Tensid (Alkylsulfonat)
Figure 1: Example of a synthetic tenside (alkyl sulfonate)

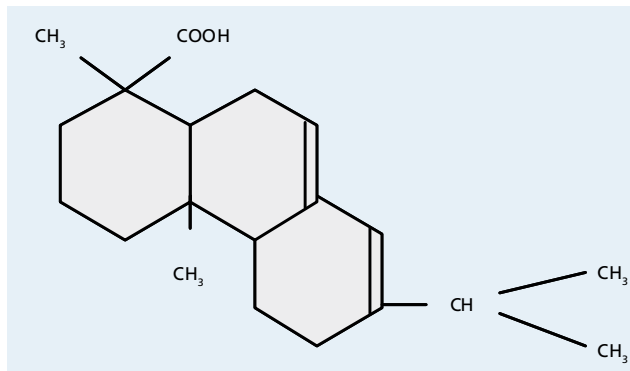


Bild 2: Aufbau der Abietinsäure (Wirkstoff des Vinsolharzes [19])
Figure 2: Structure of abietic acid (the active substance in vinsol resin [19])

einer hydrophilen polaren Carboxyl-, Sulfat- oder Sulfonatgruppe. LP-Bildner bestehen selten aus reinen Grundstoffen, sondern sind häufig Gemische verschiedener Ausgangsstoffe [7, 8]. Bild 1 zeigt beispielhaft ein einfach aufgebautes synthetisches Tensid, Bild 2 den vergleichsweise komplexen Wirkstoff des Naturproduktes Vinsolharz, die Abietinsäure. Während des Mischens stabilisiert ein Teil der im Zementleim gelösten LP-Bildner-Moleküle die durch das Mischen in den Beton eingetragenen Luftblasen. Der polare hydrophile Teil ragt dabei in das Wasser (bzw. den Zementleim) hinein, während der langkettige hydrophobe Teil in der Luftblase liegt (Bild 3).

Andere LP-Bildner-Moleküle werden mit der negativ geladenen polaren Gruppe des Moleküls an positiv geladene Teilbereiche der Zementpartikel sorbiert. Dadurch können sich Luftblasen an Zementpartikel anheften und die Stabilität des Luftporensystems wird verbessert [10–12]. Ein weiterer Teil der LP-Bildnermoleküle fällt in der Porenlösung aus. Bei der Reaktion der negativ geladenen polaren Gruppe der LP-Bildner mit positiv geladenen Calciumionen bilden sich Calciumsalze, die mehr oder weniger stark wasserlöslich sind. Die Löslichkeit der LP-Bildnermoleküle wird u.a. von der Länge der Kohlenwasserstoffkette und der Art der polaren Gruppe beeinflusst [13–15]. Bei einigen LP-Bildnern wird durch die Ausfällung von Calciumsalzen an den Grenzflächen der Luftporen deren Stabilität verbessert. Während des Mischvorgangs werden laufend neue Luftporen stabilisiert und der Luftgehalt des Frischbetons steigt an, bis kein gelöster LP-Bildner mehr in der Porenlösung vorhanden ist. Je nach Art und Zugabemenge des LP-Bildners sind unterschiedlich lange Mischdauern erforderlich, bis der LP-Bildner vollständig aktiviert ist [2]. Sorption, Schaumbildungsvermögen und die Fähigkeit zum Anheften der Luftblasen wurden bereits in [4] untersucht. Die Versuchsergebnisse hierzu sind in Abschnitt 4.2 dargestellt (siehe Bilder 9 bis 11).

2.2 Nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts

Bei einigen Betondeckenlosen wurde bei Verwendung von LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein erhöhter Luftporengehalt im Festbeton festgestellt. Eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts kann auftreten, wenn in der Mischanlage infolge einer zu kurzen Mischdauer LP-Bildner überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt einzuhalten (Bild 4 [5]). Die Prüfung

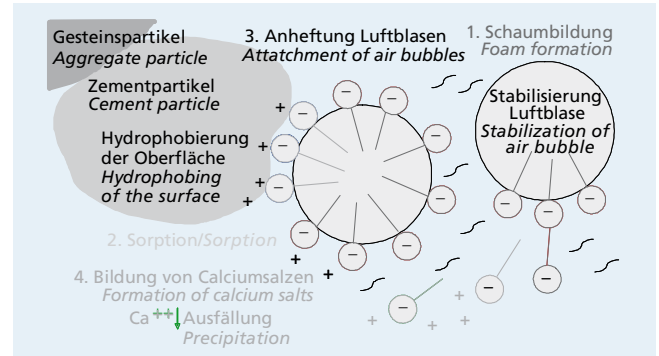


Bild 3: Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung
Figure 3: Operating mechanism of the formation of air voids

1: Schaumbildung (Stabilisierung von Luftblasen)
Foam formation (stabilization of air bubbles)
2: Sorption der LP-Bildnermoleküle und Hydrophobierung der Zementpartikel als Voraussetzung für 3
Sorption of the air-entraining agent molecules and hydrophobing of the cement particles as a precondition for 3
3: Anheftung von Luftblasen an Feststoffpartikel (Verbesserung der Stabilität des Luftporengefüges)
Attachment of air bubbles to solid particles (improving the stability of the air void structure)
4: Ausfällung in der Porenlösung durch Bildung unlöslicher Calciumsalze
Precipitation in the pore solution through the formation of insoluble calcium salts

chain with eight to twelve carbon atoms and a hydrophilic polar carboxyl, sulfate or sulfonate group. Air-entraining agents rarely consist of pure basic substances and are often mixtures of different starting materials [7, 8]. Fig. 1 shows an example of a synthetic tenside with a simple structure and Fig. 2 shows the comparatively complex active substance in the natural product vinsol resin – abietic acid. During the mixing, one fraction of the air-entraining agent molecules dissolved in the cement paste stabilizes the air bubbles introduced into the concrete by the mixing. The polar hydrophilic parts project into the water (or cement paste) while the long-chain hydrophobic parts lie in the air bubble (Fig. 3).

Other air-entraining agent molecules are sorbed with the negatively charged polar group of the molecule on the positively charged parts of the cement particle. This allows the air bubbles to stick to cement particles and improves the stability of the air void system [10–12]. Another fraction of the air-entraining agent molecules is precipitated in the pore solution. Calcium salts with varying degrees of water solubility are formed during the reaction of the negatively charged polar group of the air-entraining agent with positively charged calcium ions. The solubility of the air-entraining agent molecules is affected by, among other things, the length of the hydrocarbon chain and the nature of the polar group [13–15]. With some air-entraining agents the precipitation of calcium salts at the interfaces of the air voids improves their stability. New air voids are stabilized continuously during the mixing and the air content of the fresh concrete increases until there is no more dissolved air-entraining agent available in the pore solution. Different mixing times that depend on the nature and addition level of the air-entraining agent are needed to ensure complete activation of the air-entraining agent [2]. Sorption, foam-forming ability and the ability to fix the air bubbles have already been investigated in [4]. The relevant test results are shown in Section 4.2 (see Figs. 9–11).

2.2 Subsequent increase in air content

An increased air void content in the hardened concrete has been found in some contract sections of concrete pavement when using air-entraining agents based on synthetic active substances. A substantial increase in the air content can occur if, to achieve the required air content, increased air-

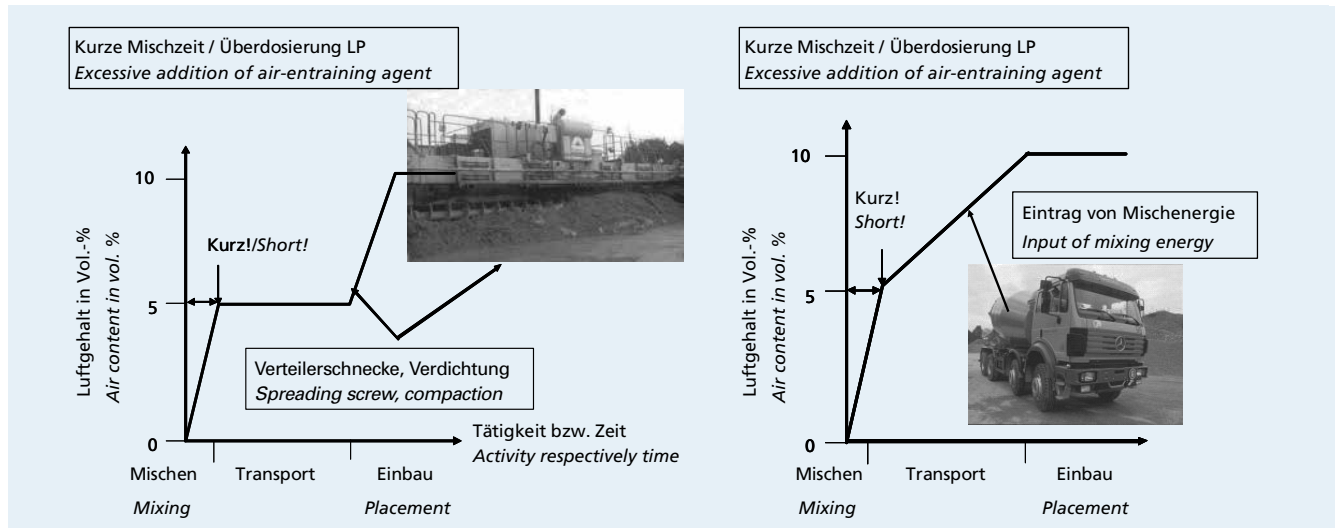


Bild 4: Nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts von baustellengemischtem Straßenbeton während des Einbaus (links) bzw. bei Transportbeton (rechts) [5]

Figure 4: Subsequent increase in the air content of site-mixed road concrete during placement (left) or with ready-mixed concrete (right) [5]

des Luftgehalts an der Mischanlage ergibt zwar dann den geforderten Wert von 4 bis 5 Vol.-%. Der Frischbeton kann aber einen Anteil an nicht ausreichend aufgeschlossenen LP-Bildner enthalten. Der Beton wird nach dem Mischen i. d. R. mit Muldenkippern zum Einbauort transportiert und während des Transports nicht gemischt. Nach dem Abkippen am Einbauort vor den Fertiger ergibt die Luftgehaltsprüfung den geforderten Wert von 4 bis 5 Vol.-%. Während des Einbaus kommt es dann zu einem Energieeintrag in den Beton, z. B. im Bereich der Verteilerschnecke des Fertigers oder während der Verdichtung. Der LP-Bildner stabilisiert die während des Mischvorgangs eingetragenen Luftblasen und der Luftgehalt steigt an (Bild 4 links).

Ähnliche Effekte sind bei Transportbeton bekannt, bei dem sich der Luftgehalt zwischen Mischwerk und Baustelle insbesondere bei drehender Trommel erhöhen kann (Bild 4 rechts). Gegebenenfalls sind die Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Festbetons gefährdet. Das Ausmaß des Nachaktivierungspotenzials des LP-Bildners wird dabei ggf. durch dessen Wirkstoffart bestimmt. Darüber hinaus wird die Wirksamkeit der LP-Bildner und damit die Luftporenbildung von zahlreichen anderen Faktoren wie z. B. der Betonzusammensetzung, der Betonherstellung, der Frischbetontemperatur und der Konsistenz des Betons beeinflusst [6, 15–18]. Um die unterschiedlichen Parameter zu berücksichtigen, wird die Zugabemenge des LP-Bildners in der Erstprüfung festgelegt und ggf. während der Bauausführung an die baupraktischen Verhältnisse angepasst.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ziel und Umfang der Versuche

Bei der Herstellung von Luftporenbeton können Fehlanwendungen auftreten, wenn die Wirkungsmechanismen nicht bekannt sind. Ziel der im Folgenden dargestellten Untersuchungen war, die auf Baustellen beobachtete nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts des Festbetons im Vergleich zum Frischbeton zu erklären. Dabei wurden die bereits in [4] vorgestellten Untersuchungsergebnisse ergänzt und in ein Modell eingearbeitet. Um das Ausmaß der nachträglichen Erhöhung – im Folgenden als Nachaktivierungspotenzial bezeichnet – wirkstoffabhängig zu quantifizieren, wurde systematisch der Einfluss von Luftporen bildenden Zusatzmitteln auf die Luftporenbildung in Leim-, Mörtel- und Betonversuchen untersucht. Dabei wurden sowohl handelsübliche LP-Bildner als auch reine Wirkstoffe verwendet.

Zunächst wurde an einem Mörtel ermittelt, inwieweit die Art und die Zugabemenge des Zusatzmittels und die Mischdauer einen Einfluss auf die Luftporenbildung haben. Zusätzlich wurde die

entraining agent has been added in the mixing plant because of an excessively short mixing time (Fig. 4 [5]). The test of the air content in the mixing plant does in fact then give the required value of 4 to 5 vol. %. However, the fresh concrete can contain a proportion of insufficiently digested air-entraining agent. After the mixing the concrete is normally transported to the point of installation in dumpers and is not mixed during transport. After the concrete has been tipped in front of the road finisher at the point of installation the air content test gives the required value of 4 to 5 vol. %. Energy is then introduced into the concrete during the placement, e.g. at the road spreading screw of the slipform paver or during compaction. The air-entraining agent stabilizes the air bubbles introduced during the mixing process and the air content rises (Fig. 4, left).

Similar effects are known with ready-mixed concrete in which the air content can rise between the mixing plant and construction site, particularly in the rotating drum (Fig. 4, right). The strength and durability properties of the hardened concrete may be compromised. The extent of the reactivation potent of the air-entraining agent may be determined by the nature of its active substance. The effectiveness of the air-entraining agent, and therefore the formation of air voids, is also affected by numerous other factors, such as the concrete composition, the concrete production, the fresh concrete temperature and the consistency of the concrete [6, 15–18]. In order to take the different parameters into account the quantity of air-entraining agent added is established during initial testing and, where necessary, is adapted to suit the actual conditions during the construction work.

3 Test procedure

3.1 Aim and extent of the tests

Mistakes in the application can occur during the production of air-entrained concrete if the action mechanisms are not understood. The aim of the investigations described below was to explain the subsequent increase in the air content of the hardened concrete observed on the construction site when compared with the fresh concrete. The investigative results already described in [4] have been supplemented and incorporated in a model. In order to quantify the extent of the subsequent increase – designated below as the reactivation potential – in relation to the active substance the influence of admixtures that form air voids on the air void formation was investigated in paste, mortar and concrete tests. Both commercially available air-entraining agents and pure active substances were used.

The extent to which the nature and addition level of the admixture and the mixing time affect the air void formation was first

Ausfällung der Wirkstoffe in Calciumhydroxidlösung untersucht. Mit Betonversuchen wurde abschließend überprüft, ob die an Leimen und Mörteln gewonnenen Erkenntnisse auch auf baupraktische Verhältnisse übertragbar sind. Aus den Versuchsergebnissen wurde ein Modell zur Erklärung des wirkstoffbedingten Nachaktivierungspotenzials abgeleitet. Darauf aufbauend konnten Empfehlungen für die Baupraxis gegeben werden, um eine gezielte Luftporenbildung möglichst unabhängig von stoff- und herstellbedingten Einflüssen sicherzustellen und das Risiko von Fehlanwendungen zu verringern.

3.2 Ausgangsstoffe

a) Luftporenbildner und Wirkstoffe

Für die Versuche wurde aus jeder der in Abschnitt 2.1 genannten vier Wirkstoffgruppen jeweils ein Wirkstoff ausgewählt. Als natürlicher Wirkstoff wurde Vinsolharz (Wurzelharz) mit einer Carboxylgruppe als polarer Gruppe eingesetzt. Als synthetische Wirkstoffe wurde jeweils ein Produkt aus den Wirkstoffgruppen Alkylpolyglycolethersulfat, Alkylsulfat und Alkylsulfonat mit einer

determined using a mortar. The precipitation of the active substances in calcium hydroxide solution was also examined. Concrete trials were then used to check whether the findings obtained with pastes and mortars can be applied to practical construction conditions. A model was compiled from the test results to explain the reactivation potential caused by the active substance. Building on this it has been possible to make recommendations for construction practice to ensure specific air void formation that is as independent as possible from the influence of materials and production conditions and to reduce the risk of mistakes in application.

3.2 Starting materials

a) Air-entraining agents and active substances

One active substance from each of the four groups of active substances listed in Section 2.1 was chosen for the trials. Vinsol resin (wood resin) with a carboxyl group as the polar group was used as the natural active substance. One product from each of the alkylpolyglycol ether sulfate, alkyl sulfate and

Tafel 1: Zuordnung der in den Zusatzmitteln verwendeten Wirkstoffe
Table 1: Allocation of the active substances used in the admixtures

Reine Wirkstoffe Pure active substances		Bezeichnung LP-Bildner Designation air-entraining agent	Wirkstoffbasis Basic active substance
Bezeichnung Designation	Agent Active substance		
W1N	Vinsolharz/Vinsol resin	LPN1	Nat. Wirkstoff/Nat. active substance
W3S	Alkylpolyglycolethersulfat Alkyl polyglycol ether sulfate	LP10S	Synthetische Tenside/Synthetic tensides
W4S	Alkylsulfat/Alkyl sulfate	LP9S	
W5S	Alkylsulfonat/Alkyl sulfonate	LP11S	

Tafel 2: Physikalische und chemische Kennwerte der verwendeten Zemente (Festigkeitsklasse 32,5 R)
Table 2: Characteristic physical and chemical values of the cements used (strength class 32,5 R)

Kennwert/Characteristic value		CEM I 32,5 R							CEM II/B-S 32,5 R Werk/Plant C2
		A	B1	B2	C1	C2	C3	D	
Erstarrungsbeginn Initial setting time	min	200	270	180	195	190	210	200	270
Wasseranspruch Water demand	%	29,5	26,0	25,0	27,0	26,0	26,0	28,0	26,0
Spez. Oberfläche nach Blaine Blaine specific surface area	cm ² /g	3 240	3 030	2 890	3 360	3 300	3 240	3 420	3 030
Le Chatelier	mm	1	1	1	1	1	1	1	1
Druckfestigkeit Compressive strength	N/mm ²								
2 Tage/days		26,2	16,1	21,0	25,7	21,6	24,3	25,9	16,1
28 Tage/days		53,0	51,4	50,6	49,0	45,3	48,9	50,3	51,4
Biegezugfestigkeit Flexural tensile strength									
2 Tage/days		5,7	3,3	4,4	5,7	4,7	5,2	5,7	3,3
28 Tage/days		8,6	9,0	7,2	7,5	9,0	9,2	9,1	9,0
K ₂ O	M.-% mass %	1,07	0,48	0,62	0,96	0,94	0,93	1,19	0,86
Na ₂ O	M.-% mass %	0,15	0,11	0,07	0,14	0,15	0,13	0,22	0,18
Na ₂ O-Äq./Na ₂ O eq.	M.-% mass %	0,85	0,43	0,47	0,78	0,77	0,74	1,00	0,75
SO ₃	M.-% mass %	2,88	3,25	3,15	3,18	2,94	2,83	3,06	2,13

Sulfat- bzw. Sulfonatgruppe als polarer Gruppe verwendet (Tafel 1). Zusätzlich wurden vier handelsübliche, mit den Wirkstoffen hergestellte LP-Bildner ausgewählt.

b) Zement

Als Zemente wurden verschiedene Portlandzemente und ein CEM II/B-S 32,5 R verwendet. Tafel 2 zeigt die wichtigsten chemischen und physikalischen Kennwerte.

c) Gesteinskörnung

Für die Herstellung der Mörtel wurde Rheinsand 0/2 mm aus dem Bereich Düsseldorf sowie Quarzkies 2/4 mm und Quarzmehl 0/0,1 mm aus dem Bereich Köln verwendet. Für die Herstellung der Betone wurde ein feinteiliger Sand 0/2 mm aus einer Kiesgrube in Sachsen, Rheinsand 0/2 mm und Rheinkies 2/8 mm und 8/16 mm aus dem Bereich Düsseldorf sowie Quarzmehl 0/0,1 mm aus dem Bereich Köln mit einer Sieblinie in der Mitte des Sieblinienbereichs A/B 16 nach DIN 1045-2 eingesetzt.

d) Zugabewasser

Für die Herstellung der Mörtel und Betone wurde Düsseldorfer Leitungswasser verwendet. Die Leimuntersuchungen wurden mit deionisiertem Leitungswasser durchgeführt.

3.3 Luftporenbildung in Mörtel und Beton

3.3.1 Allgemeines

Mit Mörtelversuchen sollte untersucht werden, ob die Art und die Zugabemenge des Zusatzmittels bzw. die Mischintensität (Mischdauer) einen Einfluss auf die Luftporenbildung haben und ob die an reinen Wirkstoffen gewonnenen Ergebnisse auch auf handelsübliche LP-Bildner übertragbar sind. Die Mörtelzusammensetzung wurde so gewählt, dass dieser wie Straßenbeton eine steife Konsistenz aufwies. Anschließend wurde mit baupraktischen Betonen der Einfluss der Betonzusammensetzung und der Frischbetontemperatur auf die Luftporenbildung und das Nachaktivierungspotenzial ermittelt. Die Zugabemenge des Zusatzmittels wurde in einem Vorversuch so festgelegt, dass der Luftgehalt des Mörtels bzw. Betons nach zweiminütiger Mischdauer ($5,0 \pm 0,5$) Vol.-% betrug. Mit dieser „einfachen“ Zugabemenge des Vorversuchs und einer demgegenüber verdoppelten und verdreifachten Dosierung wurde anschließend die Mischdauerabhängige Luftporenbildung der Mörtel und Betone ermittelt.

3.3.2 Vorversuch

a) Mischungszusammensetzung der Mörtel

Die Zusatzmittel (vier Wirkstoffe/drei LP-Bildner) wurden einem Mörtel mit einem Zementgehalt von 400 kg/m^3 und einem w/z-Wert von 0,45 zugegeben (Tafel 3). Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus 6,9 Vol.-% Quarzmehl 0/0,1 mm, 23,1 Vol.-% Rheinkies 0/2 mm und 70 Vol.-% Quarzkies 2/4 mm. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug $1\,666,5 \text{ kg/m}^3$.

b) Mischungszusammensetzung der Betone

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen auf baupraktische Verhältnisse wurden die LP-Bildner: LP1N mit geringem, LP9S mit mittlerem und LP10S mit hohem Nachaktivierungspotenzial einem Beton mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und einem w/z-Wert von 0,45 zugegeben (Betone B1 bis B3 nach Tafel 3). Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus Rheinkies 0/16 mm und Quarzmehl 0/0,2 mm. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug $1\,767 \text{ kg/m}^3$, der Sandanteil lag bei 34 Vol.-%.

Die Wirkung der LP-Bildner wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst: Wassergehalt, Gehalt an Feinstoffen, Temperatur und Konsistenz des Betons. Das Kornhaufwerk des Gesteinskörnungsgemischs selbst führt in unterschiedlichem Ausmaß Luft ein und bewirkt beim Mischen, dass sich Bläschen bilden und sich diese in kleinere aufteilen. Die genannten Faktoren erschweren die Voraussage der Wirkung der LP-Bildner und machen es eigentlich notwendig, die vorgesehene Baustellenmischung selbst zu prüfen. Daher wurden mit dem LP-Bildnern LP1N (Serie A) mit ge-

alkyl sulfonate active substance groups with a sulfate or sulfonate group as the polar group were chosen as the synthetic active substances (Table 1). Four commercially available air-entraining agents produced with the active substances were also chosen.

b) Cement

Various Portland cements and a CEM II/B-S 32,5 R cement were used. Table 2 shows the most important chemical and physical characteristic values.

c) Aggregate

0/2 mm Rhine sand from the Duesseldorf region as well as 2/4 mm quartz gravel and 0/0.1 mm quartz meal from the Cologne area were used for producing the mortars. The concretes were produced using a low-fines 0/2 mm sand from a gravel pit in Saxony, 0/2 mm Rhine sand and 2/8 and 8/16 mm Rhine gravel from the Duesseldorf area as well as 0/0.1 mm quartz meal from the Cologne area with a grading curve in the middle of the A/B 16 grading curve area specified in DIN 1045-2.

d) Mixing water

Duesseldorf tap water was used for producing the mortars and concretes. The paste investigations were carried out with de-ionized tap water.

3.3 Air void formation in mortar and concrete

3.3.1 General

The mortar trials were intended to investigate whether the nature and addition level of the admixture and the mixing intensity (mixing time) have an influence on the air void formation and whether the results obtained with pure active substances can also be applied to commercially available air-entraining agents. The mortar composition was chosen so that it had a stiff consistency like paving concrete. The influence of the concrete composition and the fresh concrete temperature on the air void formation and reactivation potential was then determined with the types of concrete used in practice. The amount of admixture to be added was established in a preliminary trial so that the air content of the mortar or concrete was 5.0 ± 0.5 vol. % after a mixing time of two minutes. The air void formation in the mortars and concretes in relation to mixing time was then determined with this "single" addition level from the preliminary trial and with double and triple addition levels.

3.3.2 Preliminary trial

a) Mix composition of the mortars

Each admixture (four active substances/three air-entraining agents) was added to a mortar with a cement content of 400 kg/m^3 and a w/c ratio of 0.45 (Table 3). The aggregate mix comprised 6.9 vol. % 0/0.1 mm quartz meal, 23.1 vol. % 0/2 mm Rhine sand and 70 vol. % 2/4 mm quartz gravel. The aggregate content was 1666.5 kg/m^3 .

b) Mix composition of the concretes

In order to check the applicability of the results of the mortar investigations to practical building conditions the following air-entraining agents – LP1N with a low reactivation potential, LP9S with a medium reactivation potential and LP10S with a high reactivation potential – were added to a concrete with a cement content of 350 kg/m^3 and a w/c ratio of 0.45 (concretes B1 to B3 in Table 3). The aggregate mix comprised 0/16 mm gravelly Rhine sand and 0/0.2 mm quartz meal. The aggregate content amounted to 1767 kg/m^3 , and the sand accounted for 34 vol. %.

The action of an air-entraining agent is affected by a large number of factors – water content, fines content, temperature and consistency of the concrete. The particulate mass of the aggregate mix itself introduces air to differing extents and has the effect during mixing that small bubbles form and then divide into smaller ones. The factors listed make it difficult to predict the effect of the air-entraining agent and actually make it necessary to test the intended site mix itself. Air-entraining agent LP1N (series A) with

Tafel 3: Mörtel- und Betonzusammensetzungen und Ergebnisse der Prüfungen am frischen und erhärteten Mörtel bzw. Beton
Table 3: Mortar and concrete compositions and results of the tests on fresh and hardened mortar and concrete

Mörtel bzw. Beton <i>Mortar resp. concrete</i>		Zement aus Werk <i>Cement from plant</i>	LP-Bildner/ Wirkstoff <i>Air- entraining agent/Active substance</i>	Zugabemenge <i>Addition level</i>		Frishmörtel bzw. Frischbeton <i>Fresh mortar or fresh concrete</i>		Erhärteter Mörtel bzw. Festbeton <i>Hardened mortar or solid concrete</i>			
				LP-Bildner <i>Air- entraining agent</i>	Wirkstoff <i>Active substance</i>	Luftporen- gehalt <i>Air void content</i>	Verdichtungs- maß <i>Compacting factor</i>	β_{D28}	Luftporenkennwerte <i>Characteristic air void values</i>		
									A	A ₃₀₀	$\bar{L}$
				M.-% v. z mass % w.r.t. c		Vol.-% vol. %	–	N/mm²	Vol.-% vol. %	Vol.-% vol. %	mm
Mörtel <i>Mortar</i>	M1	A	W3S	0,0140	0,0027	5,5	1,27	48,7	6,0	2,5	0,15
	M2	A	W4S	0,0050	0,0050	5,0	1,28	51,1	5,8	2,5	0,19
	M3	A	W5S	0,0050	0,0050	4,5	1,28	52,5	5,7	2,2	0,17
	M4	A	LP1N	0,0700	0,0152	5,2	1,34	49,3	5,4	2,5	0,14
	M5	A	LP9S	0,0350	0,0037	5,0	1,33	50,9	5,6	2,2	0,16
	M6	A	LP10S	0,0340	0,0018	4,9	1,28	51,2	5,6	2,5	0,15
	M7	A	W1N	0,0100	0,0100	4,8	1,34	51,7	5,7	2,1	0,20
Beton <i>Concrete</i>	B1	C1	LP1N	0,0540	0,0117	4,8	1,32	50,6	5,2	2,3	0,15
	B2	C1	LP9S	0,0360	0,0038	4,9	1,26	46,7	4,5	2,3	0,14
	B3	C1	LP10S	0,0390	0,0021	4,8	1,28	47,7	5,8	2,6	0,18

Tafel 4: Betonzusammensetzungen und Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen
(Zement CEM I 32,5 R mit Ausnahme der Betone 10a/b: CEM II/B-S 32,5 R)
Table 4: Concrete compositions and results of the fresh and hardened concrete tests
(CEM I 32,5 R cement with the exception of concretes 10a/b: CEM II/B-S 32,5 R cement)

Nr./No.	Zement- werk Cement plant	w/z-Wert w/c ratio	Feinst- sandgehalt kg/m³ <i>Ultra-fine sand content</i>	Frisch- beton- temp. <i>Fresh- concrete temp.</i>	LP-Bildner- Zugabemenge <i>Air-entraining agent addition level</i>		Luftporengehalt <i>Air void content</i>		Verdichtungsmaß <i>Compacting factor</i>		28-Tage- Druckfestigkeit <i>28-day compressive strength</i>	
			kg/m³	°C	M.-% v. z mass % w.r.t. c		Vol.-% vol %	–		N/mm²		
Betone/Concretes 4a bis/to 15a: LP-Bildner/Air-entraining agent LP1N Betone/Concretes 4b bis/to 15b: LP-Bildner/Air-entraining agent LP10S					LP1N	LP10S	LP1N	LP10S	LP1N	LP10S	LP1N	LP10S
B4a/b	C2	0,45	30	20	0,035	0,024	5,4	5,3	1,20	1,25	44,3	46,6
B5a/b	C2	0,45	53	20	0,045	0,032	4,8	5,0	1,27	1,29	49,2	50,0
B6a/b	C2	0,45	92	20	0,061	0,041	5,0	4,8	1,31	1,30	47,9	47,1
B7a/b	C2	0,45	133	20	0,061	0,035	4,7	4,9	1,32	1,38	46,5	48,9
B8a/b	C2	0,45	92	10	0,035	0,020	4,8	4,8	1,19	1,22	48,9	50,3
B9a/b	C2	0,45	92	30	0,110	0,060	5,5	5,5	1,34	1,30	44,5	44,5
B10a/b	B2	0,45	92	20	0,046	0,035	4,7	5,5	1,28	1,27	45,3	44,3
B11a/b	C3	0,40	92	20	0,100	0,050	5,1	5,0	1,41	1,38	53,4	55,1
B12a/b	C3	0,45	92	20	0,051	0,033	4,8	5,4	1,29	1,25	49,1	44,5
B13a/b	C3	0,50	92	20	0,041	0,024	5,1	5,4	1,09	1,08	36,8	37,3
B14a/b	B2	0,45	92	20	0,042	0,025	4,9	5,0	1,24	1,31	47,9	49,2
B15a/b	D	0,45	92	20	0,061	0,041	4,8	4,6	1,22	1,26	46,2	49,1

ringem und mit dem LP-Bildner LP10S (Serie B) mit hohem Nachaktivierungspotenzial der Einfluss folgender Parameter auf die Luftporenbildung untersucht (Tafel 4):

- Zement: CEM I 32,5 R der Werke B2, C2 und D (Betone B14, B6 und B15 nach Tafel 4) sowie CEM II/B-S 32,5 R des Werks C (Beton B10)
- Frischbetontemperatur: 10 °C, 20 °C und 30 °C (Betone B8, B6 und B9)
- Sieblinie: Variation des Feinstsandgehalts durch Verwendung von Natursand (Beton B4) bzw. von drei im Labor zusammengesetztem Sanden mit kleinem, mittlerem und erhöhtem Quarzmehlanteil (Betone B5 bis B7). Die Feinstsandgehalte 0/0,25 mm der Betone lagen bei 30, 53, 92 und 133 kg/m³ (Betone B4 bis B7 nach Tafel 4).
- Wasserzementwert: 0,40; 0,45 und 0,50 (Betone B11 bis B13)

c) Herstellung, Lagerung und Prüfung der Mörtel und Betone

Herstellung
Die Zugabemenge des jeweiligen Zusatzmittels wurde so eingestellt, dass bei einer Mischdauer von zwei Minuten und der Frischmörteltemperatur von 20 °C bzw. der gewählten Frischbetontemperatur (10 °C, 20 °C, 30 °C) der Luftgehalt des Mörtels geprüft mit dem 1-l-Drucktopf bzw. der Luftgehalt des Betons geprüft mit dem 8-l-Drucktopf zehn Minuten nach der Herstellung (5,0 ± 0,5) Vol.-% betrug. Zement und Gesteinskörnungen wurden in einem 50-l-Zwangsmischer (Mörtel) bzw. 150-l-Zwangsmischer (Beton) 15 Sekunden trocken vorgemischt. Das Zusatzmittel wurde unmittelbar vor dem Mischen des Mörtels bzw. Betons dem Zugabewasser zugegeben. Die Mischdauer nach Zugabe aller Bestandteile betrug zwei Minuten. Zehn Minuten nach der Herstellung wurden für die Prüfungen am erhärteten Mörtel bzw. Beton drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge zur Bestimmung der 28-Tage-Druckfestigkeit und ein Würfel mit 150 mm Kantenlänge zur Bestimmung der Luftporenkennwerte hergestellt. Die Würfel und der Luftporentopf wurden auf dem Rütteltisch verdichtet.

Lagerung

Die vier Würfel wurden nach dem Ausschalen bis zum Alter von sieben Tagen unter Wasser und danach im Klimaraum bei rd. 20 °C und rd. 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die drei für die Druckfestigkeitsprüfung hergestellten Probekörper verblieben bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen im Klimaraum. Der für die Bestimmung der LP-Kennwerte vorgesehene Probekörper wurde rd. zwei Wochen im Klimaraum bis zu dem Zeitpunkt gelagert, an dem aus dem Würfel zwei Scheiben für die Bestimmung der LP-Kennwerte entnommen wurden.

Prüfungen

Zehn Minuten nach der Herstellung des Mörtels bzw. Betons wurde das Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 sowie der Luftgehalt im Drucktopf (Mörtel: 1 Liter bzw. Beton: 8 Liter) in Anlehnung an DIN EN 12350-7 bestimmt. Die Druckfestigkeit der Mörtel und Betone wurde im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-4 und die LP-Kennwerte des erhärteten Mörtels bzw. Betons in Anlehnung an DIN EN 480-11 bestimmt. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tafel 3 zusammengestellt.

3.3.3 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischdauer

Die für die Mörteluntersuchungen vorgesehenen Zusatzmittel (3 LP-Bildner/4 Wirkstoffe) und die drei für die Betonuntersuche ausgewählten LP-Bildner wurden in drei Zugabemengen (Zugabemenge des Vorversuchs (Tafel 3) bzw. erhöhte – doppelte und dreifache – Zugabemenge) direkt vor dem Mischen des Mörtels bzw. Betons dem Zugabewasser zugegeben. Die Betone 4a/b bis 15a/b wurden nur mit einfacher und doppelter Zugabemenge hergestellt. Nach Zugabe aller Bestandteile wurde der Mörtel bzw. Beton 30 Sekunden gemischt, anschließend der Mischer kurz angehalten, Mörtel bzw. Beton für die Prüfung des Luftgehalts mit dem Drucktopf entnommen und unmittelbar der Luftgehalt bestimmt. Sofort nach der Entnahme des Mörtels bzw. Betons aus

a low reactivation potential and air-entraining agent LP10S (series B) with a high reactivation potential were therefore used to examine the influence of the following parameters on air void formation (Table 4):

- Cement: CEM I 32,5 from works B2, C2 and D (concretes B14, B6 and B15 in Table 4) and CEM II/B-S 32,5 R from works C (concrete B10)
- Fresh concrete temperature: 10 °C, 20 °C and 30 °C (concretes B8, B6 and B9)
- Grading curve: variation of the ultrafine sand content by using natural sand (concrete B4) and three sands made up in the laboratory containing small, medium and high levels of quartz meal (concretes B5 to B7). The quantities of 0/0.25 mm ultrafine sand in the concrete were 30, 53, 92 and 133 kg/m³ (concretes B4 to B7 in Table 4).
- Water/cement ratio: 0.40, 0.45, and 0.50 (concretes B11 to B13)

c) Production, storage and testing of the mortars and concretes

Production

The quantity of the particular admixture added was set so that with a mixing time of two minutes and a fresh mortar temperature of 20 °C or the chosen fresh concrete temperature (10 °C, 20 °C, 30 °C) the air content of the mortar tested with the 1 l pressure vessel or the air content of the concrete tested with the 8 l pressure vessel ten minutes after production was 5.0 ± 0.5 vol. %. The cement and aggregate were premixed under dry conditions for 15 seconds in a 50 l mechanical mixer (mortar) or 150 l mechanical mixer (concrete). The admixture was added to the mixing water immediately before the mortar or concrete was mixed. The mixing time after addition of all constituents was two minutes. Ten minutes after the production three cubes with edge lengths of 150 mm for determining the 28-day compressive strength and one cube with edge lengths of 150 mm for determining the air void parameters were produced for the tests on the hardened mortar or concrete. The cubes and the air void vessel were compacted on a vibrating table.

Storage

After the four cubes had been removed from the moulds they were stored under water up to the age of seven days and then in a climatic chamber at about 20 °C and about 65 % relative air humidity. The three test pieces produced for the compressive strength test remained in the climatic chamber until the test at 28 days. The test piece designated for determination of the air void parameters was stored in the climatic chamber for about two weeks until two slices were taken from the cube for determining the air void parameters.

Testing

Ten minutes after production of the mortar or concrete the compacting factor was determined as specified in DIN EN 12350-4 and the air content was determined in the pressure vessel (mortar: 1 litre and concrete: 8 litre) using the procedure described in DIN EN 12350-7. The compressive strengths of the mortars and concretes were measured at 28 days in accordance with DIN EN 12390-4 and the air void parameters of the hardened mortar or concrete were determined using the procedure described in DIN EN 480-11. The results of these tests are summarized in Table 3.

3.3.3 Air void formation in relation to mixing time

The admixtures designated for the mortar investigations (3 air-entraining agents/4 active substances) and the three air-entraining agents chosen for the concrete investigations were added to the mixing water at three additions levels (addition level for the preliminary trial (Table 3) and increased – double and triple – addition levels) immediately before the mixing of the mortar or concrete. The concretes 4a/b to 15a/b were only produced with the single and double addition levels. After all the constituents had been added the mortar or concrete was mixed for 30 seconds; the mixer

dem Mischer wurde die Restmenge weiter gemischt. Der Luftgehalt der Mörtel wurde nach 1, 2, 4, 7, 10 und zusätzlich – wenn noch ein Anstieg des Luftgehalts mit zunehmender Mischdauer zu verzeichnen war – nach einer Mischdauer von 15 Minuten bestimmt. Der Luftgehalt der Betone wurde nach Mischdauern von 1, 2, 4, 6, 8 sowie 10 und 15 Minuten geprüft. An ausgewählten Betonen wurden zusätzlich die LP-Kennwerte am Festbeton an Probekörpern ermittelt, die nach Mischdauern von 30 Sekunden, zwei bzw. sechs Minuten hergestellt wurden. Herstellung, Lagerung und Prüfung der Mörtel und Betone entsprach Abschnitt 3.3.2.

3.4 Einfluss der Zusatzmittel auf die Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung

Durch die unterschiedliche Molekülstruktur der Wirkstoffe kann sich der Anteil des im Frischbeton gelösten LP-Bildners ändern. Nur der gelöste Anteil steht bei einem Eintrag von Mischenergie für die Stabilisierung von Luftporen zur Verfügung. Wirkstoffart und Zugabemenge des verwendeten Zusatzmittels bestimmen somit maßgeblich die Mischdauerabhängige Luftporenbildung und das Nachaktivierungspotenzial. Für eine effektive Luftporenbildung sind die Fähigkeit zur Luftblasenstabilisierung (Schaumbildungsvermögen) und zur Anheftung der Luftblasen an Feststoffpartikel von großer Bedeutung. Die erfolgreiche Anheftung der Luftblasen setzt ein gutes Sorptionsvermögen und eine ausreichende Schaumbildung der Zusatzmittel voraus. Beide Kennwerte können durch Flotationsversuche beschrieben werden. Die Luftblasenstabilisierung wird durch die Sorption und das Schaumbildungsvermögen der Wirkstoffe und deren Ausfällung in der Porenlösung beeinflusst. Die Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Sorptions- und Flotationsverhaltens sowie zum Schaumbildungsvermögen wurde bereits in [4] beschrieben. Daher werden in diesem Beitrag nur die Versuchsergebnisse in Abschnitt 4.5 dargestellt.

Da die Löslichkeit der Zusatzmittel wesentlich die Fähigkeit zur Stabilisierung der eingemischten Luftblasen bestimmt, wurde die Ausfällung der Wirkstoffe nach Zugabe in eine gesättigte Calciumhydroxidlösung untersucht. Um die Lösung herzustellen, wurden 10 g Calciumhydroxid-Pellets in 1 l Wasser gelöst. Die Lösung wurde abfiltriert, um eine Sorption von Zusatzmittelmolekülen an in der Lösung noch vorhandenen Feststoffen zu verhindern. Anschließend wurde die gesättigte Calciumhydroxidlösung mit dem jeweiligen Wirkstoff in Mengen zugegeben, die der in den Mörteluntersuchungen gewählten einfachen, zweifachen und dreifachen und zusätzlich einer zehnfachen Zugabemenge bezogen auf den Zementgehalt entsprachen. Dabei wurde ein w/z-Wert von 0,50 angenommen. Nach der Zugabe wurden die dotierten Lösungen nochmals abfiltriert und danach im Filtrat die TOC-Konzentration (Total Organic Carbon) bestimmt. Der Vergleich der TOC-Konzentration des aus dem Zusatzmittel stammenden TOC und der TOC-Konzentration in der Lösung ermöglicht die Angabe des löslichen bzw. ausgefallenen Wirkstoff-Anteils. Die Untersuchungen zum Sorptions- und Flotationverhalten, dem Schaumbildungsvermögen und der Löslichkeit wurden mit den Wirkstoffen W1N, W3S, W4S und W5S und dem CEM I des Werks A durchgeführt.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Luftporenbildner und Wirkstoffe

Infolge der gezielten Auswahl der Wirkstoffe konnte die Molekülstruktur der drei synthetischen Wirkstoffe exakt angegeben werden (Bild 5). Die in industriellen Prozessen hergestellten synthetischen Tenside sind vergleichsweise reine homogene Stoffe mit einem Wirkstoffgehalt von rd. 100 M.-%. Die Kettenlänge der hydrophoben Kohlenwasserstoffkette betrug zwischen 12 und 18 Kohlenstoffatomen und entsprach damit dem in der Literatur angegebenen Bereich. Beim Wirkstoff W3S (Alkylpolyglycolethersulfat) wurde die hydrophile polare Gruppe durch zwei EO-Gruppen (Ether-Einheiten) wesentlich verlängert. Das Vinsolharz W1N ist ein komplex zusammengesetztes inhomogenes Naturprodukt, das

was then stopped briefly and mortar or concrete was removed for testing the air content with the pressure vessel and the air content was determined immediately. The mixing of rest of the material was continued immediately after the mortar or concrete had been removed from the mixer. The air content of the mortar was determined after 1, 2, 4, 7 and 10 minutes and also – if the air content still continued to increase with increasing mixing time – after 15 minutes. The air content of the concretes was tested after mixing times of 1, 2, 4, 6 and 8 minutes as well as after 10 and 15 minutes. Selected concretes were also used for determining the air void parameters in the hardened concrete using test pieces that had been produced after mixing times of 30 seconds and two and six minutes. The mortars and concretes were produced, stored and tested as described in Section 3.3.2.

3.4 Influence of the admixtures on the operating mechanisms of air void formation

The amount of air-entraining agent dissolved in the fresh concrete can vary due to the different molecular structures of the active substances. Only the amount that is dissolved is available for stabilizing the air voids during the input of mixing energy. This means that the air void formation, which is dependent on the mixing time, and the reactivation potential are to a great extent determined by the nature and addition level of the admixture used. The ability to stabilize air bubbles (foam-forming ability) and to attach the air bubbles to solid particles is of major importance for effective air void formation. Successful attachment of the air bubbles requires the admixture to have a good sorption capability and adequate foam formation. Both characteristic values can be described by flotation trials. The air bubble stabilization is influenced by the sorption and foam-forming ability of the active substances and their precipitation in the pore solution. The test procedure to determine the sorption and flotation behaviour as well as the foam-forming ability have already been described in [4]. This article therefore just gives the test results in Section 4.5.

The ability to stabilize the air bubbles that have been introduced is essentially determined by the solubility of the admixture, so the precipitation of the active substances after addition of a saturated calcium hydroxide solution was examined. The solution was produced by dissolving 10 g calcium hydroxide pellets in 1 l water. The solution was filtered to prevent sorption of admixture molecules on any solids still present in the solution. The active substance in question was then added to the saturated calcium hydroxide solution in quantities that corresponded to the single, double and triple addition levels chosen in the mortar investigations and also to a ten-times addition level with respect to the cement content. A w/c ratio of 0.50 was adopted. After the addition the treated solutions were again filtered and the TOC (total organic carbon) concentration in the filtrate was measured. Comparison of the TOC concentration from the TOC coming from the admixture with the TOC concentration in the solution makes it possible to specify the percentages of the active substance that are soluble and precipitated. The investigations into the sorption and flotation behaviour, the foam-forming ability and the solubility were carried out with the active substances W1N, W3S, W4S and W5S and the CEM I cement from works A.

4 Test results

4.1 Air-entraining agents and active substances

Careful selection of the active substances meant that it was possible to specify the molecular structures of the three synthetic active substances exactly (Fig. 5). The synthetic tensides produced in industrial processes were comparatively pure homogeneous substances with an active substance content of approximately 100 mass %. The chain length of the hydrophobic hydrocarbon chain lay between 12 and 18 carbon atoms and therefore corresponded to the range given in the literature. With active substance W3S (alkylpolyglycol ether sulfate) the hydrophilic polar group was substantially extended by two EO groups (ether units).

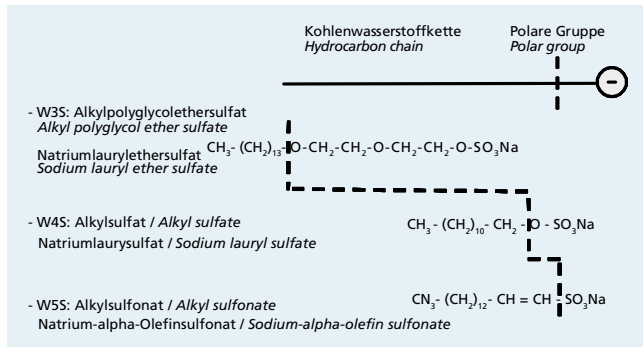


Bild 5: Chemische Formeln der verwendeten synthetischen Wirkstoffe (Gestrichelte Linie kennzeichnet die Länge der polaren Gruppe)

Figure 5: Chemical formulae of the synthetic active substances used (dotted line indicates the length of the polar group)

aus einer Vielzahl von Komponenten besteht. Die Abietinsäure gilt als eigentlicher Wirkstoff des Vinsolharzes (s. Bild 2).

Informationen über die chemische Zusammensetzung der LP-Bildner wurden aus einem automatischen rechnergestützten Vergleich der IR-Spektren der Wirkstoffe und LP-Bildner mit einer im FIZ vorhandenen umfassenden Spektrendatei gewonnen. Die verwendeten LP-Bildner konnten aufgrund der Spektrenvergleiche den ausgewählten Wirkstoffen zugeordnet werden. Die detaillierten Ergebnisse können [5] entnommen werden. Bei dem LP-Bildner LP1N mit natürlicher Wirkstoffbasis wurde danach der Wirkstoff Vinsolharz W1N als wesentlicher Bestandteil verwendet. Bei den LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis stellt der Wirkstoff W3S einen wesentlichen Bestandteil des LP-Bildners LP10S dar. Die Wirkstoffe W4S bzw. W5S wurden für die Herstellung der LP-Bildner LP9S bzw. W11S verwendet. Die Kenntnis der Molekülstruktur der Wirkstoffe ermöglicht eine Zuordnung zum Verhalten der Wirkstoffe bzw. den damit hergestellten LP-Bildnern in den Leim-, Mörtel- und Betonversuchen.

4.2 Einfluss des Zusatzmittels auf die Luftporenbildung in Mörtel und Beton

4.2.1 Konsistenz, Druckfestigkeit und Luftporenkennwerte

In den Vorversuchen zur Einstellung der Zusatzmittel-Zugabemenge wurden Konsistenz, 28-Tage-Druckfestigkeit und LP-Kennwerte bestimmt (s. Tafel 3 in Teil 1). Die sieben Mörtel und drei Betone wiesen mit Verdichtungsmaßen zwischen 1,27 und 1,34 die gewünschte steife Konsistenz auf. Systematische, durch den LP-Bildner bzw. Wirkstoff bedingte Unterschiede waren nicht erkennbar. Die 28-Tage-Druckfestigkeit der Mörtel lag zwischen 47,0 und 52,5 N/mm² und entsprach der Druckfestigkeit der drei Straßenbetone. Die geringen Unterschiede sind vorrangig auf Schwankungen des Luftporengehalts zurückzuführen. Die Bestimmung der LP-Kennwerte am erhärteten Mörtel ergab, dass die Abstandsfaktoren zwischen 0,14 und 0,20 mm (Anforderung Erstprüfung ≤ 0,20 mm) und die Mikro-Luftporengehalte zwischen 2,1 und 2,7 Vol.-% (Anforderung Erstprüfung ≥ 1,8 Vol.-%) lagen. Ähnliche Größenordnungen wiesen die Straßenbetone B1 bis B3 auf. Die Anforderungen des Regelwerks [5, 6] an das Luftporensystem wurden somit erfüllt. Eine systematische Abhängigkeit der LP-Kennwerte von der Wirkstoffart (synthetisch bzw. natürlich) konnte nicht festgestellt werden.

4.2.2 Erforderliche Zugabemenge

Die im Vorversuch ermittelte erforderliche Zugabemenge (Wirkstoff) zur Erzielung des Luftgehalts des Mörtels von (5,0 ± 0,5) Vol.-% betrug in Abhängigkeit vom Zusatzmittel 0,0018 M.-% (LP10S) bis 0,0152 M.-% (LP1N) v. z. (s. Tafel 3). Bei den Zusatzmitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis waren höhere Wirkstoffkonzentrationen (0,065 bis 0,0152 M.-%) erforderlich, um den angestrebten Luftgehalt zu erreichen. Die synthetischen Wirkstoffe (Zugabemengen von 0,0018 bis 0,0050 M.-%) wiesen somit eine

The vinsol resin W1N is an inhomogeneous natural product with a complex composition that consists of a large number of components. Abietic acid is the actual active substance in vinsol resin (see Fig. 2).

Information about the chemical composition of the air-entraining agents was obtained from automatic computer-aided comparison of the IR spectra of the active substances and the air-entraining agents with a comprehensive file of spectra available at the FIZ. The air-entraining agents used were assigned to the selected active substances on the basis of the comparison of the spectra. The detailed results can be found in [5]. The active substance vinsol resin W1N was used as the main constituent for the air-entraining agent LP1N based on natural active substances. For the air-entraining agents based on synthetic active substances the active substance W3S forms an essential constituent of the air-entraining agent LP10S. The active substances W4S and W5S were used for producing the air-entraining agents LP9S and W11S respectively. An understanding of the molecular structures of the active substances makes it possible to correlate them with the behaviour of the active substances and the air-entraining agents produced with them in the paste, mortar and concrete trials.

4.2 Influence of the admixture on air void formation in mortar and concrete

4.2.1 Consistency, compressive strength and air void parameters

The consistency, 28-day compressive strength and air void parameters were determined in the preliminary trials to establish the addition levels for the admixtures (see Table 3). The seven mortars and three concretes with compacting factors between 1.27 and 1.34 exhibited the required stiff consistencies. There were no discernable systematic differences due to the air-entraining agents or active substances. The 28-day compressive strengths of the mortars lay between 47.0 and 52.5 N/mm² and corresponded to the compressive strengths of the three pavement concretes. The small differences can be attributed primarily to fluctuations in air void content. Determination of the air void parameters in the hardened mortar showed that the spacing factors lay between 0.14 and 0.20 mm (initial testing requirement ≤ 0.20 mm) and the micro air void contents lay between 2.1 and 2.7 vol. % (initial testing requirement ≥ 1.8 vol. %). The pavement concretes B1 to B3 exhibited values of a similar order of magnitude. The requirements of the regulations [5, 6] for the air void system were therefore fulfilled. No systematic dependence of the air void parameters on the nature of the active substance (synthetic or natural) could be detected.

4.2.2 Required addition levels

The addition levels (active substance) determined in the preliminary trial that were required to achieve an air content in the mortar of 5.0 ± 0.5 vol. % were (depending on the admixture) 0.0018 mass % (LP10S) to 0.0152 mass % (LP1N) w.r.t. cement (see Table 3). Higher active substance concentrations (0.065 to 0.0152 mass %) were required for the admixtures based on natural active substances in order to achieve the target air content. The synthetic active substances (addition levels of 0.0018 to 0.0050 mass %) were therefore more effective. Comparable addition levels of air-entraining agent were required for the mortars and concretes (see Table 3).

4.2.3 Air void formation in relation to mixing time

The formation of air voids in relation to mixing time is shown in Figs. 6a to j for the seven mortar mixes and the three concretes. In the left-hand column are each of the four pure active substances W1N, W3S, W4S and W5S, in the middle column are the air-entraining agents produced with them – LP1N (active substance W1N), LP9S (active substance W4S) and LP10S (active substance W3S), and in the right-hand column are the three concretes made with the same air-entraining agents. The synthetic active substances W4S and W5S have the same curve shapes, so only one air-entraining agent was chosen.

größere Wirksamkeit auf. Bei Mörteln und Betonen wurden vergleichbare Zugabemengen LP-Bildner benötigt (s. Tafel 3 in Teil 1).

4.2.3 Mischdauerabhängige Luftporenbildung

Die Mischdauerabhängige Luftporenbildung ist für die sieben Mörtelmischungen und die drei Betone in den Bildern 6 a bis j dargestellt: In der linken Spalte jeweils die vier reinen Wirkstoffe W1N, W3S, W4S und W5S, in der mittleren Spalte die damit hergestellten LP-Bildner LP1N (Wirkstoff W1N), LP9S (Wirkstoff W4S) und LP10S (Wirkstoff W3S) und in der rechten

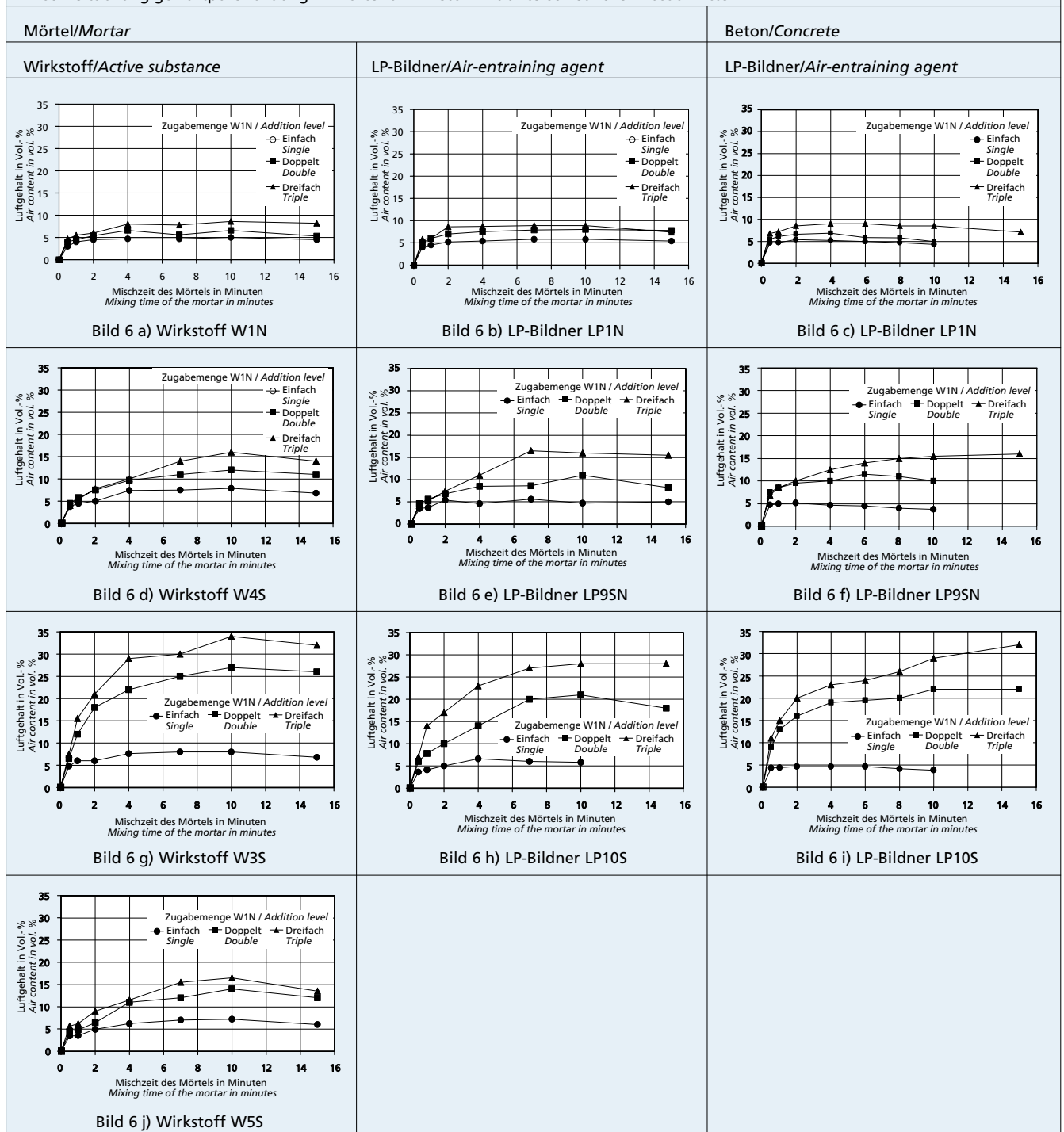
a) Single addition level

Virtually the same behaviour pattern was found at the single addition level, regardless of the admixture used. The target air content of about 5 vol. % was reached after a mixing time of about 1 minute, after which there was no further substantial change. Air voids were occasionally expelled with increasing mixing time with the result that the air content fell slightly.

b) Double and triple addition levels

Different behaviour patterns, which depended on the active substance, occurred with the increased addition levels. For the agents

Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Mörtel bzw. Beton mit unterschiedlichen Zusatzmitteln



Bilder 6 a bis j: Luftgehalt des Mörtels bzw. Betons in Abhängigkeit von der Mischdauer und der Zugabemenge des Zusatzmittels
 Figures 6 a to j: Air content of the mortar or concrete in relation to mixing time and addition level of admixture

Spalte die drei Betone mit den gleichen LP-Bildnern. Da die synthetischen Wirkstoffe W4S und W5S gleichartige Kurvenverläufe aufwiesen, wurde nur ein LP-Bildner ausgewählt.

a) einfache Zugabemenge

Bei einfacher Zugabemenge zeigte sich unabhängig vom verwendeten Zusatzmittel ein nahezu gleichartiges Verhalten. Der angestrebte Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% wurde nach einer Mischdauer von rd. einer Minute erreicht und veränderte sich danach nicht mehr wesentlich. Mit zunehmender Mischdauer wurden vereinzelt Luftporen ausgetrieben, sodass der Luftgehalt etwas abfiel.

b) doppelte und dreifache Zugabemenge

Bei erhöhter Zugabemenge zeigte sich ein unterschiedliches wirkstoffabhängiges Verhalten. Bei den Mitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis stieg der Luftgehalt bei Verdreifachung der Zugabemenge von rd. 5 Vol.-% auf rd. 8 Vol.-% an (Wirkstoff WN1 Vinsolharz und LP-Bildner LP1N). Nach einer Mischdauer von maximal einer Minute änderte sich der Luftgehalt nicht mehr. Bei Verwendung der Wirkstoffe Alkylsulfat und Alkylsulfonat (W4S und LP-Bildner LPS9 sowie W5S) stieg der Luftgehalt der Mörtel bei dreifacher Zugabemenge mit rd. 15 Vol.-% auf das dreifache und bei den Mörteln mit dem Wirkstoff W3S bzw. dem LP-Bildner LPS10 mit rd. 30 bis 35 Vol.-% sogar auf das sechsfache des Luftgehalts der einfachen Zugabemenge an. Es waren auch deutlich längere Mischdauern erforderlich, bis der gesamte LP-Bildner bzw. Wirkstoff vollständig aktiviert war und sich ein konstanter Luftgehalt einstellte. Diese Versuchsergebnisse bestätigten sich auch bei den drei Betonen.

c) Charakterisierung der Luftporenbildung

Das Verhalten der Zusatzmittel kann wirkstoffabhängig drei Gruppen zugeordnet werden. Bei der ersten Gruppe mit den Mitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis (LP-Bildner und Wirkstoffe) stieg der Luftgehalt bei Verdreifachung der Zugabemenge unterproportional von rd. 5 auf rd. 8 Vol.-% an. Bei diesen Zusatzmitteln ist nur ein geringes Nachaktivierungspotenzial zu erwarten. Bei den synthetischen Tensiden war ein anderes Verhalten zu beobachten. Die Zusatzmittel auf der Basis von Alkylsulfat bzw. Alkylsulfonate (W4S und W5S, LP9) wiesen einen Anstieg von 5 auf 15 Vol.-% auf. Sie sind der Gruppe 2 mit einem mittleren Nachaktivierungspotenzial zuzuordnen. Die Zusatzmittel auf der Basis von Alkylpolyglycolethersulfat (W3S und LP10S) erreichten die stärkste Luftporenbildung (Anstieg von 5 auf 35 Vol.-%) und weisen ein hohes Nachaktivierungspotenzial (Gruppe 3) auf.

4.3 Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf die Luftporenbildung

4.3.1 Erforderliche LP-Bildner-Zugabemenge

Der Einfluss ausgewählter Parameter auf die Luftporenbildung im Beton wurde beispielhaft mit dem LP-Bildner LP1N mit geringem und dem LP-Bildner LP10S mit hohem Nachaktivierungspotenzial untersucht. Die erforderlichen Zugabemengen für einen Luftgehalt von $(5,0 \pm 0,5)$ Vol.-% sind für die Betone mit dem LP-Bildner LP1N (Serie A) bzw. dem LP-Bildner LP10S (Serie B) in Abhängigkeit der untersuchten Parameter: Zement, Sieblinie, w/z-Wert und Frischbetontemperatur in Tafel 4 (s. Teil 1 dieses Berichts) und Bild 7 zusammengestellt. Trotz unterschiedlicher LP-Bildner-Wirkstoffarten wirkten sich die Einflussfaktoren annähernd gleichartig auf die Zugabemengen aus. Mit dem synthetischen LP-Bildner LP10S wurden wesentlich geringere Mengen benötigt.

Die Zugabemenge beider LP-Bildner musste gesteigert werden bei:

- höherem Feinstsandgehalt (Betone B4, B5, B6, B7)
- höherer Frischbetontemperatur (Betone B8, B6, B9)
- geringerem Leimgehalt und gleichzeitig steiferem Leim (geringerer w/z-Wert bei gleichbleibendem Zementgehalt: Betone B11, B12, B13).

Auch bei den Betonen mit unterschiedlichem Portlandzement (Werk B2, B14), C2 bzw. C3 (B6 bzw. B12), D (B14)) bzw. unterschiedlicher Zementart (CEM II/B-S-Zement, B10) wa-

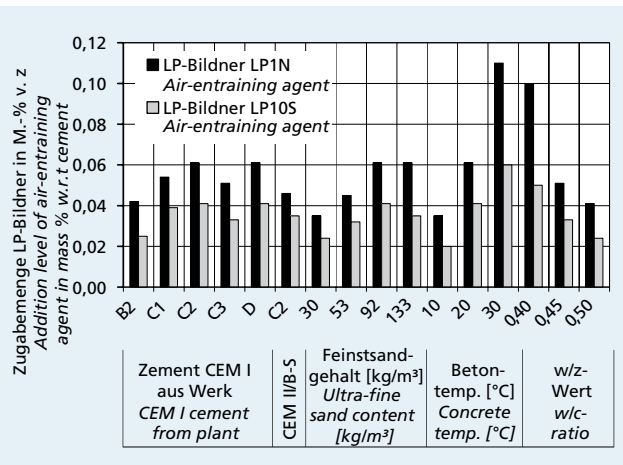


Bild 7: Zugabemenge der LP-Bildner LP1N und LP10S in Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung und der Frischbetontemperatur
Figure 7: Addition levels of air-entraining agents LP1N and LP10S in relation to the mix composition and the fresh concrete temperature

based on natural active substances the air content for the triple addition level rose from about 5 vol. % to about 8 vol. % (active substance W1N1 vinsol resin and air-entraining agent LP1N). After a mixing time of one minute at most there was no further change in air content. When the alkyl sulfate and alkyl sulfonate active substances were used (W4S and air-entraining agents LP9S and W5S) the air content of the mortars at the triple addition level rose to about 15 vol. %, i.e. about three times the air content for the single addition level, and for the mortars containing the active substance W3S or the air-entraining agent LPS10 it rose to about 30 to 35 %, i.e. by a factor of six. A significantly longer mixing time was also required before the entire air-entraining agent or active substance was fully activated and a constant air content was established. These test results were also confirmed with the three concretes.

c) Characterization of the air void formation

The behaviour patterns of the admixtures can be assigned to three groups, depending on the active substance. For the first group with agents based on natural active substances (air-entraining agents and active substances) there was a disproportionately low increase in air content from about 5 to about 8 vol. % when the addition level was tripled. Only a slight reactivation potential is to be expected with these admixtures. A different behaviour was observed with the synthetic tensides. The admixtures based on alkyl sulfate or alkyl sulfonates (W4S and W5S, LP9) exhibited an increase from 5 to 15 vol. %. They can be allocated to Group 2 with a moderate reactivation potential. The admixtures based on alkylpolyglycol ether sulfate (W3S and LP10S) achieved the highest air void formation (rise from 5 to 35 vol. %) and exhibited a high reactivation potential (Group 3).

4.3 Influence of different external conditions on air void formation

4.3.1 Requisite air-entraining agent addition level

The influence of selected parameters on air void formation in concrete was investigated using the examples of the air-entraining agents LP1N with a low reactivation potential and LP10S with a high reactivation potential. The addition levels needed to achieve an air content of 5.0 ± 0.5 vol. % are listed in Table 4 and Fig. 7 for concretes containing the air-entraining agents LP1N (series A) and LP10S (series B) in relation to the parameters investigated, i.e. cement, grading curve, w/c ratio and fresh concrete temperature. In spite of the different types of active substances in the air-entraining agents the influencing factors had very similar effects on the addition levels. Substantially smaller addition levels were required with the synthetic air-entraining agent LP10S.

ren unterschiedliche LP-Bildner-Zugabemengen erforderlich. Ob diese Unterschiede auf physikalische (z. B. Mahlfineinheit) oder chemische Kennwerte der Zemente (z. B. Alkaligehalt) zurückzuführen sind, kann wegen der geringen Anzahl der verwendeten industriellen Zemente nicht angegeben werden.

Den stärksten Einfluss auf die Zugabemenge hatte die Verarbeitbarkeit. Betone mit steiferer Konsistenz infolge höherer Frischbetontemperatur oder Betone mit geringerem Leimgehalt (geringerer w/z-Wert bei gleichbleibendem Zementgehalt) erforderten wesentlich höhere Zugabemengen. So bewirkte ein Anstieg der Frischbetontemperatur von 10 °C (B8, Verdichtungsmaß rd. 1,20) auf 30 °C (B9, Verdichtungsmaß rd. 1,32) ungefähr eine Verdreifung der erforderlichen LP-Bildner-Zugabemenge. Bei der Temperatur muss ein zusätzlicher chemischer Einfluss (Zusammenwirken von LP-Bildner und temperaturabhängig entstehenden unterschiedlichen Hydratationsprodukten) berücksichtigt werden. Ein höherer Feinstsandanteil 0/0,25 mm (B7) erschwerte die Luftporenbildung, da für die Einführung der Mikro-Luftporen < 300 µm weniger Zwischenräume im Korngerüst vorhanden sind. Ein hoher Anteil der Korngruppe 0,25/1 mm (B4) erleichterte die Luftporenbildung, da sich die Mikro-Luftporen in die Zwischenräume des Korngerüsts einlagern können.

4.3.2 Mischdauerabhängige Luftporenbildung

4.3.2.1 Luftgehalt des Frischbetons

Die Abhängigkeit der Luftporenbildung von der Mischdauer des Betons wurde für alle Parameter mit der im Vorversuch ermittelten einfachen und doppelten Zugabemenge bei Verwendung der LP-Bildner LPN1 (geringes Nachaktivierungspotenzial) und LP10S (hohes Nachaktivierungspotenzial) ermittelt. Wegen des großen Einflusses der Frischbetontemperatur wurde dieser Parameter beispielhaft in Bild 8 dargestellt. Die anderen Parameter werden nur summarisch erläutert, die detaillierten Ergebnisse können [5] entnommen werden.

a) einfache Zugabemenge der LP-Bildner LPN1 und LP10S

Bei einfacher Zugabemenge zeigten sich keine Unterschiede in der Luftporenbildung. Der angestrebte Luftgehalt von rd. (5,0 ± 0,5) Vol.-% wurde unabhängig von der Frischbetontemperatur, dem verwendeten Zement, dem Feinstsandgehalt und der Wirkstoffart des LP-Bildners nach einer Mischdauer von rd. einer Minute erreicht. Danach erhöhte sich der Luftgehalt nicht mehr wesentlich und blieb konstant. Die Wirkung der LP-Bildner wurde daher bei einfacher Zugabemenge durch die unterschiedlichen Randbedingungen nicht beeinflusst.

The addition levels of the two air-entraining agents had to be increased for:

- higher levels of ultrafine sand (concretes B4, B5, B6, B7)
- higher fresh concrete temperature (concretes B8, B6, B9)
- lower paste content and stiffer paste (lower w/c ratio) for the same cement content: (concretes B11, B12, B13).

Different addition levels of air-entraining agent were also required for the concretes made with different Portland cements (works B2, B14), C2 and C3 (B6 and B12), D (B14) or different types of cement (CEM II/B-S cement, B10). Because of the small number of industrial cements used it was not possible to establish whether these differences were attributable to physical (e.g. fineness) or chemical (e.g. alkali content) parameters of the cements.

The workability had the greatest influence on the addition level. Concretes with stiffer consistency as a consequence of higher fresh concrete temperature or concretes with lower paste content (lower w/c ratio for the same cement content) required substantially higher addition levels. For example, an increase in the fresh concrete temperature from 10 °C (B8, compacting factor about 1.20) to 30 °C (B9, compacting factor about 1.32) required about three times as much air-entraining agent. Where temperature is concerned it is also necessary to take an additional chemical effect into account (interaction of air-entraining agent and the different hydration products produced depending on the temperature). A higher 0/0.25 mm ultrafine sand fraction (B7) made air void formation more difficult as fewer interstitial spaces were available in the granular skeleton for the introduction of micro air voids < 300 µm. A larger proportion of the 0.25/1 mm size group (B4) assisted air void formation as the micro air voids could embed themselves in the interstitial spaces in the granular skeleton.

4.3.2 Air void formation in relation to mixing time

4.3.2.1 Air content of the fresh concrete

The dependence of air void formation on the mixing time of the concrete was determined for all parameters with the single and double addition levels established in the preliminary trial when using the air-entraining agents LPN1 (low reactivation potential) and LP10S high reactivation potential. Because of the major influence of the fresh concrete temperature this parameter is shown by way of example in Fig. 8. The effects of the other parameters are only summarized; the detailed results can be found in [5].

a) Single addition level for air-entraining agents LPN1 and LP10S

With the single addition level there were no differences in air

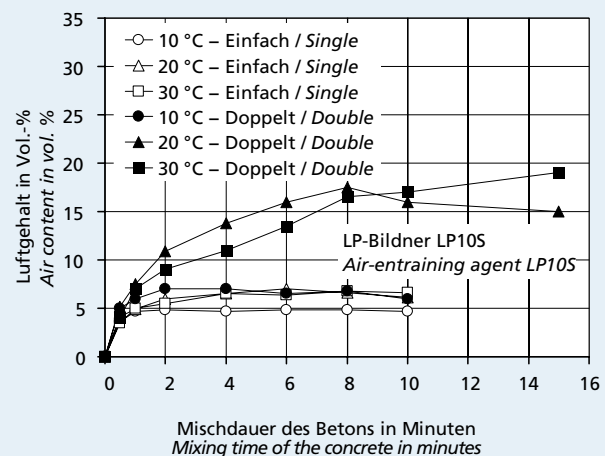
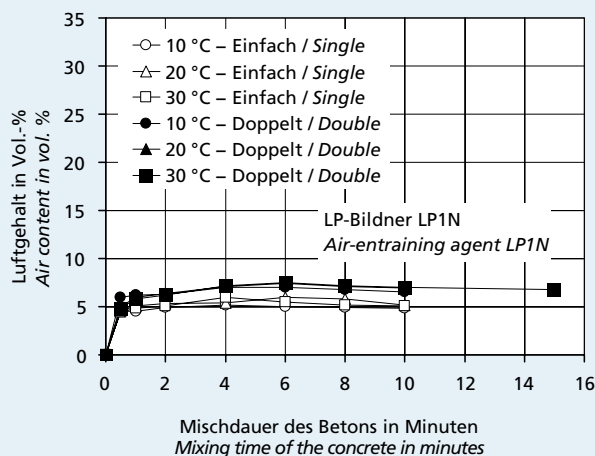


Bild 8: Luftgehalt des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischdauer und der Frischbetontemperatur bei Verwendung des LP-Bildners LPN1 (links) und des LP-Bildners LP10S (rechts)

Figure 8: Air content of the fresh concrete in relation to mixing time and fresh concrete temperature when using air-entraining agent LPN1 (left) and air-entraining agent LP10S (right)

b) doppelte Zugabemenge der LP-Bildner LP1N und LP10S
Bei doppelter Zugabemenge zeigten sich Unterschiede in Abhängigkeit der Wirkstoffbasis des LP-Bildners. Beim LP-Bildner LP1N auf natürlicher Wirkstoffbasis mit geringem Nachaktivierungspotenzial erhöhten sich die Luftgehalte i. d. R. bei Verdoppelung der Zugabemenge bei allen Versuchsvarianten nur unterproportional um rd. 2 bis 3 auf rd. 7 bis 8 Vol.-%. Nach einer Mischdauer von rd. zwei Minuten war der Beharrungszustand erreicht und die Luftgehalte änderten sich nicht mehr. Die Luftporenbildung wurde nur in vergleichsweise geringem Ausmaß von den Parametern Frischbetontemperatur, Zementart, Feinstsandgehalt oder Mischdauer beeinflusst. Beim synthetischen LP-Bildner LP10S mit hohem Nachaktivierungspotenzial ergab sich bei Verdoppelung der Zugabemenge i. d. R. mindestens eine Verdoppelung des Luftgehalts. Kennzeichnend für die Luftporenentwicklung der Betone mit Frischbetontemperaturen von 20 und 30 °C war ein starker Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge bis auf maximal rd. 18 Vol.-% (Bild 8 rechts). Auch nach zwei Minuten Mischdauer war die Luftporenbildung noch nicht abgeschlossen und der Luftgehalt erhöhte sich stetig. Eine Ausnahme bildete nur die Frischbetontemperatur von 10 °C, wo bei Verdoppelung der Zugabemenge nur ein geringer Anstieg des Luftgehalts zu verzeichnen und die Luftporenbildung bereits nach rd. einminütiger Mischdauer abgeschlossen war. Ursache hierfür ist die weiche Konsistenz, die die Luftporenbildung erleichtert, sodass nur eine geringe Zugabemenge des LP-Bildners LP10S erforderlich ist, um den Luftgehalt von 5 Vol.-% zu erreichen. Auch bei Verdoppelung der Zugabemenge sind die LP-Bildnermoleküle nach einer kurzen Mischdauer vollständig aktiviert.

4.3.2.2 Luftporenkennwerte des Festbetons

Die LP-Kennwerte des Festbetons wurden in Abhängigkeit von der Mischdauer (30 Sek. bzw. zwei und sechs Minuten) mit einfacher und doppelter Zugabemenge der LP-Bildner LP1N und LP10S ermittelt (Mischungen B6a und B6b, Tafel 5). Der Luftgehalt des Festbetons erreichte bei einfacher Zugabemenge nach mindestens zwei Minuten Mischdauer einen Beharrungszustand und veränderte sich durch weiteres Mischen nicht mehr wesentlich.

void formation. The target air content of about 5.0 ± 0.5 vol. % was achieved after a mixing time of about one minute regardless of the fresh concrete temperature, the cement used, the ultrafine sand content, and nature of the active substance in the air-entraining agent. After that the air content remained constant with no substantial increase. The action of the air-entraining agent at the single addition level was therefore not influenced by the different external conditions.

b) Double addition level for air-entraining agents LP1N and LP10S

Differences in the dependence on the basic active substance in the air-entraining agent became apparent at the double addition level. With air-entraining agent LP1N based on a natural active substance with low reactivation potential there was, as a rule, a disproportionately low increase in the air content in all the different trials of only about 2 to 3 vol. % to about 7 to 8 vol. %. The equilibrium condition was reached after a mixing time of about two minutes and there was no further change in air content. The air void formation was influenced to only a comparatively small extent by the fresh concrete temperature, cement type, ultrafine sand content and mixing time. With the synthetic air-entraining agent LP10S with a high reactivation potential the air content was, as a rule, at least doubled when the addition level was doubled. The air void formation of the concretes with fresh concrete temperatures of 20 and 30 °C was characterized by a sharp rise in the air content with the double addition level to a maximum of about 18 vol. % (Fig. 8, right). The air void formation was not completed after a mixing time of two minutes and the air content rose steadily. The only exception to this was the fresh concrete temperature of 10 °C where doubling the addition level caused only a slight increase in air content and the air void formation was complete after a mixing time of about one minute. The reason for this was the soft consistency that assists the air void formation, with the result that only a small quantity of the air-entraining agent LP10S is needed to achieve an air content of 5 vol. %. Even when the addition level is doubled the air-entraining agent molecules are fully activated after a short mixing time.

Tafel 5: Luftporenkennwerte am Festbeton in Abhängigkeit von der Mischdauer und der Zugabemenge
Table 5: Characteristic air void values in the hardened concrete in relation to mixing times and addition level

Nr./No.	LP-Bildner Air-entraining agent	Zugabemenge M.-% v. z. Addition level mass % w.r.t. c	Mischzeit in Min Mixing time in min	Luftporenkennwerte/characteristic air void values			
				$\bar{L}$ in mm	A_{300} in vol. %	A in vol. %	A_{300}/A
B6a	LP1N	0,061 (Einfach/Single)	0,5	0,21	1,4	2,8	0,50
			2	0,14	2,9	5,3	0,55
			6	0,10	3,4	5,4	0,63
		0,122 (Doppelt/Double)	0,5	0,17	2,5	4,5	0,56
			2	0,11	4,0	6,9	0,58
			6	0,07	5,3	7,1	0,75
B6b	LP10S	0,041 (Einfach/Single)	0,5	0,26	1,5	4,5	0,33
			2	0,14	3,6	6,5	0,55
			6	0,11	4,7	8,5	0,55
		0,082 (Doppelt/Double)	0,5	0,21	2,6	5,5	0,48
			2	0,09	7,1	13,0	0,55
			6	0,07	9,1	15,8	0,58

lich. Bei doppelter Zugabemenge erhöhte sich der Luftgehalt beim LP-Bildner LP1N nach sechsminütiger Mischdauer nur unwesentlich von rd. 5 auf 7 Vol.-%, während beim LP-Bildner LP10S ein Anstieg von 8,5 auf 16 Vol.-% auftrat. Dies bestätigt die Versuchsergebnisse zur Mischdauerabhängigen Entwicklung des Frischbetonluftgehalts (Abschnitt 4.2.3).

Mit zunehmender Mischdauer verringerte sich der Abstandsfaktor, während sich Mikro-Luftporengehalt und Luftgehalt und das Verhältnis Mikro-Luftporengehalt zum Gesamtluftgehalt vergrößerten. Eine verlängerte Mischdauer bewirkt daher eine Verfeinerung des Luftporensystems. Bei einfacher Zugabemenge und kurzer Mischdauer von 30 Sekunden wurden die Anforderungen an den Abstandsfaktor mit 0,21 bzw. 0,26 mm ($\leq 0,20$ mm) und den Mikro-Luftporengehalt mit 1,4 bzw. 1,5 Vol.-% ($\geq 1,8$ Vol.-%) bei beiden LP-Bildnern nicht eingehalten. Allerdings betrug der Luftgehalt zu diesem Zeitpunkt auch nur 2,8 bzw. 4,5 Vol.-%. Spätestens nach zwei Minuten Mischdauer hatte sich bei einfacher Zugabemenge der Luftgehalt auf rd. 5 Vol.-% erhöht und die Anforderungen an die LP-Kennwerte wurden eingehalten.

Eine Verkürzung der Mischdauer und eine Überdosierung des LP-Bildners kann daher auch Auswirkungen auf das entstehende Luftporengefüge haben. Bei doppelter Zugabemenge und verkürzter Mischdauer (30 Sekunden) wurde zwar bei Verwendung des LP-Bildners LP10S der geforderte Frischbeton-Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% erreicht, das Luftporengefüge entsprach jedoch mit einem Abstandsfaktor von 0,21 mm nicht den Anforderungen. Erst die Verlängerung der Mischdauer gewährleistete das gewünschte feine Luftporensystem. Eine Verkürzung der Mischdauer und die Überdosierung des LP-Bildners kann daher in der Praxis dazu führen, dass die geforderten LP-Kennwerte nicht erreicht werden, obwohl der am Frischbeton bestimmte Gesamtluftgehalt den Anforderungen entspricht. In diesem Fall besteht das Risiko eines verminderten Frost-Tausalz-Widerstands.

4.4 Einfluss der Wirkstoffart auf die Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung

4.4.1 Schaumbildungsvermögen des Wirkstoffs

In einem standardisierten Versuchsablauf wurden in einem Standzylinder Wasser, Zement und Zusatzmittel gemischt, feine Luftblasen in die Suspension eingebracht und die Höhe des in einem Zylinder entstehenden Schaums gemessen. Die Zugabemenge des Zusatzmittels wurde so lange gesteigert, bis der Schaum über den Zylinderrand hinaustrat. Dieser Zustand wird durch den in Bild 9 dargestellten Pfeil angezeigt und entspricht einer Schaumhöhe von 16 cm. Das Vinsolharz (W1N) auf natürlicher Wirkstoffbasis zeigte bei gleicher Wirkstoff-Zugabemenge die geringste Schaumbildung. Die synthetischen Wirkstoffe W4S und W5S (Alkylsulfat bzw. Alkylsulfonat) wiesen eine stärkere Schaumbildung auf. Insbesondere der Wirkstoff W3S (Alkylpolyglycolethersulfat) schäumte wesentlich stärker. Bei den synthetischen Wirkstoffen können vergleichsweise geringe Änderungen der Zugabemenge sehr große Unterschiede in der Schaumbildung bewirken. Dies entspricht den Versuchsergebnissen der Mischdauerabhängigen Luftporenbildung im Mörtel bzw. Beton.

4.4.2 Sorptionsverhalten des Wirkstoffs

4.4.2.1 Sorption an Zement

Eine erfolgreiche Zementflotation bedingt die Anheftung von Luftblasen an Zementpartikel. Voraussetzung ist die Sorption der Zusatzmittel-Moleküle an Zement. Der Vergleich der aus dem Wirkstoff in einen Zementleim ($w/z = 1$) eingebrachten mit der im Filtrat gemessenen Konzentration diente als Maß für die Sorption der Wirkstoffe. In Bild 10 wurde der sorbierte Anteil des insgesamt zugegebenen Zusatzmittels in Abhängigkeit von dessen N-facher Zugabemenge dargestellt. Unabhängig von der Zugabemenge wird zwischen 60 % bis 80 % des jeweiligen Wirkstoffs sorbiert. Das Sorptionsverhalten wird somit nicht wesentlich von der Wirkstoffart beeinflusst.

4.3.2.2 Air void parameters in hardened concrete

The air void parameters in hardened concrete were determined in relation to mixing time (30 seconds or two and six minutes) with single and double addition levels of the air-entraining agents LP1N and LP10S (mixes B6a and B6b, Table 5). With the single addition level the air content of the hardened concrete reached an equilibrium condition after a mixing time of at least two minutes and was not changed substantially by further mixing. With the double addition level the air content with air-entraining agent LP1N rose only slightly from about 5 to 7 vol. % after a mixing time of six minutes, while with air-entraining agent LP10S there was a rise from 8.5 to 16 vol. %. This confirms the test results concerning the growth of the fresh concrete air content in relation to mixing time (Section 4.2.3).

The spacing factor fell with increasing mixing time, while the micro air void content, the air content and the ratio of micro air content to total air content increased. An extended mixing time therefore refines the air void system. With the single addition level and short mixing time of 30 seconds the two air-entraining agents with spacing factors of 0.21 and 0.26 mm (≤ 0.20) and micro air contents of 1.4 and 1.5 vol. % (≥ 1.8 vol. %) did not comply with the requirements. However, at this time the air contents were also only 2.8 and 4.5 vol. % respectively. After a mixing time of two minutes at the latest the air content with the single addition level had risen to about 5 vol. % and the requirements for the air void parameters were met.

Shortening the mixing time and adding excess air-entraining agent can therefore also affect the resulting air void micro structure. With the double addition level and shortened mixing time (30 seconds) the required fresh concrete air content of about 5 vol. % was in fact met when using air-entraining agent LP10S but the air void microstructure with a spacing factor of 0.21 mm did not meet the requirements. The desired fine air void system could only be ensured by extending the mixing time. Shortening the mixing time and adding excess air-entraining agent can therefore mean that in practice the required air void parameters are not achieved although the total air content measured in the fresh concrete does comply with the requirements. In this case there is the risk of reduced resistance to freeze-thaw with de-icing salt.

4.4 Influence of the type of active substance on the operating mechanisms of air void formation

4.4.1 Foam-forming ability of the active substance

Water, cement and admixture were mixed in a cylindrical vessel in a standardized test procedure; fine air bubbles were then introduced into the suspension and the height of the foam produced in the cylinder was measured. The quantity of admixture added was increased until the foam escaped over the edge of the cylinder. This condition is indicated by the arrow in Fig. 9 and corresponds to a foam height of 16 cm. The vinsol resin (W1N) based on natural active substances exhibited the lowest foam formation for the same quantity of active substance added. The synthetic active substances W4S and W5S (alkyl sulfate and alkyl sulfonate) exhibited stronger foam formation, while the active substance W3S (alkylpolyglycol ether sulfate) foamed substantially more strongly. Comparatively small changes in the amount added can cause very large differences in the foam formation with the synthetic active substances. This corresponds to the test results for air void formation in mortar and concrete in relation to mixing time.

4.4.2 Sorption behaviour of the active substance

4.4.2.1 Sorption on cement

Successful cement flotation requires the air bubbles to adhere to cement particles. The basic requirement for this is sorption of the admixture molecules on the cement. Comparison of the concentration introduced into a cement paste ($w/c = 1$) from the active substance with the concentration measured in the filtrate serves as a measure for the sorption of the active substances. The proportion of the total amount of added admixture that has been sorbed is shown in Fig. 10 as a function of its N-times addition level. Between 60 %

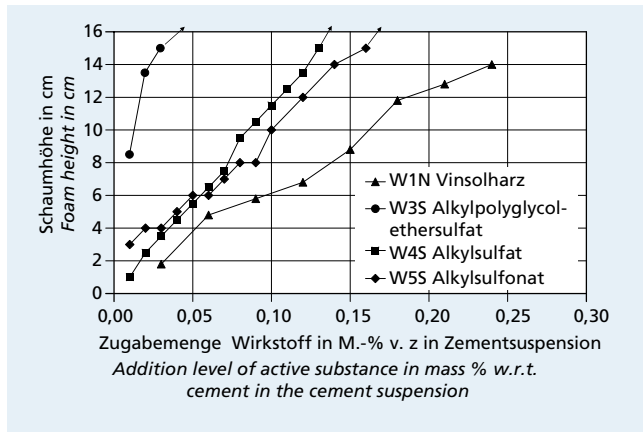


Bild 9: Schaumbildung in Zementsuspension in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs

Figure 9: Foam formation in the cement suspension in relation to the addition level of the active substance

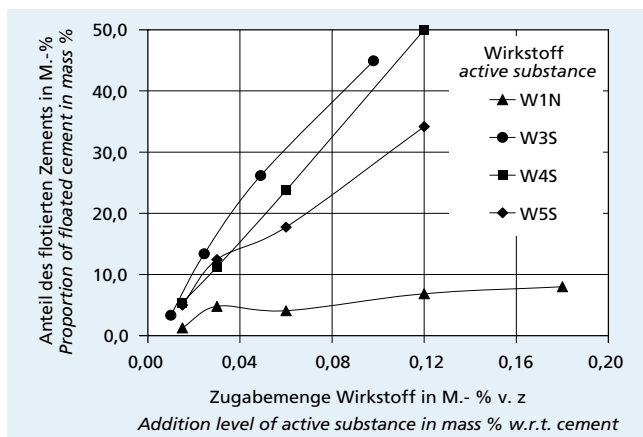


Bild 11: Anteil des flотиerten Zements in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs

Figure 11: Proportion of floated cement in relation to the addition level of active substance

4.4.2.2 Flotationsversuche

In einem standardisierten Flotationsversuch wurden in einem Behälter Wasser, Zement und Wirkstoff gemischt und feine Luftblasen in die Suspension eingebracht. Wenn Wirkstoff-Moleküle an Zementpartikel sorbiert werden, können sich Luftblasen anlagern (s. Bild 1) und mit dem Zement an die Wasseroberfläche steigen, wo der entstehende Schaum abgeschöpft und nach dessen Trocknung die Masse des flötierten Zements bestimmt wurde. Der Prozentanteil des flötierten Zements wurde in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs aufgetragen (Bild 11). Der Anteil stieg bei den Zusatzmitteln mit synthetischer Wirkstoffbasis mit zunehmender Zugabemenge deutlich bis auf rd. 50 M.-% an. Beim Zusatzmittel mit natürlicher Wirkstoffbasis war ein nur geringer Anstieg bis auf rd. 10 M.-% zu verzeichnen. Die Ergebnisse der Flotationsversuche und der Versuche zur Mischdauerabhängigen Luftporenbildung zeigen, dass bei den synthetischen Zusatzmitteln eine Erhöhung der Zugabemenge mit einem erhöhten Anteil an flötierten Zement und mit einem stärkeren Anstieg des Luftgehalts bei verlängerter Mischdauer verbunden ist. Obwohl bei dem natürlichen Wirkstoff Vinsolharz eine ausreichende Schaumbildung und Sorption vorhanden ist, stieg der Anteil an flötiertem Zement nur geringfügig an. Möglicherweise können nicht alle gebildeten Luftblasen an Zementpartikel anheften und/oder ein größerer Anteil des Vinsolharzes fällt aus.

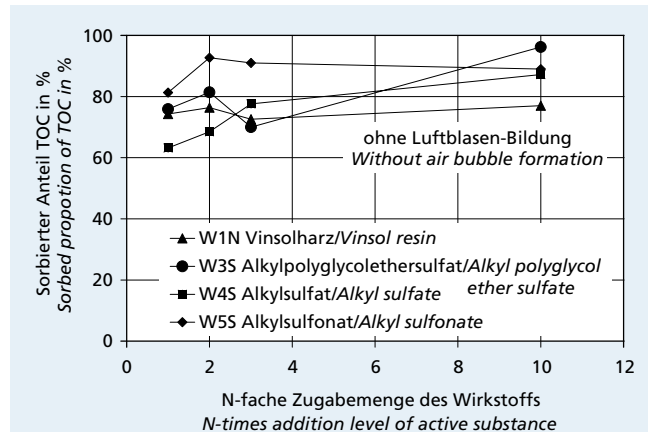


Bild 10: Sorbierter Anteil des Wirkstoffs in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs

Figure 10: Proportion of active substance that is sorbed, in relation to the addition level of the active substance

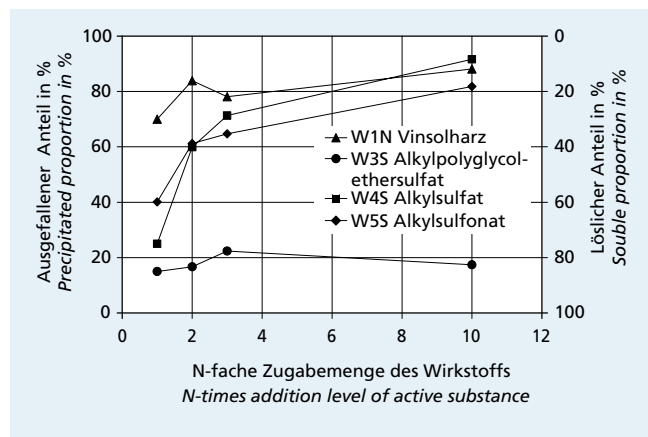


Bild 12: Ausfällen in Calciumhydroxidlösung in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs

Figure 12: Precipitation in calcium hydroxide solution in relation to the addition level of active substance

and 80 % of the particular active substance is sorbed regardless of the addition level, so the sorption behaviour is not substantially affected by the type of active substance.

4.4.2.2 Flotation trials

Water, cement and active substance were mixed in a container in a standardized flotation trial and fine air bubbles were introduced into the suspension. If molecules of the active substance are sorbed on cement particles then air bubbles can become attached (see Fig. 1) and rise with the cement to the surface of the water. The resulting foam is skimmed off and dried, and the mass of floated cement is determined. The percentage of floated cement was plotted against the quantity of active substance added (Fig. 11). With the admixtures based on synthetic active substances the percentage increased significantly to about 50 mass % with increasing addition level. Only a slight rise to about 10 mass % was recorded with the admixture based on natural active substances. The results of the flotation trials and of the trials to test the air void formation in relation to mixing time showed that for the synthetic admixtures an increase in the quantity added is associated with an increased proportion of floated cement and a greater rise in air content with extended mixing time. Although there was adequate foam formation and sorption with the vinsol resin natural active substance the proportion of floated cement increased only slightly. Possibly

4.4.3 Löslichkeit/Ausfällung des Wirkstoffs in Calciumhydroxidlösung
Der Vergleich der aus dem Zusatzmittel in die Lösung eingebrachten mit der im Filtrat gemessenen Konzentration diente als Maß für die Löslichkeit der Zusatzmittel. In Bild 12 wurde in Abhängigkeit der N-fachen Zugabemenge des Wirkstoffs der ausgefallene bzw. gelöste Anteil dargestellt. Dabei zeigte sich ein wirkstoffspezifisches Verhalten der Zusatzmittel. Der natürliche Wirkstoff W1N wies eine schlechte Löslichkeit im gesamten Konzentrationsbereich auf. Ursache ist vermutlich, dass einzelne Wirkstoffmoleküle des komplex zusammengesetzten Vinsolharzes unterschiedliche Löslichkeiten aufweisen. Die Wirkstoffe W4S (Alkylsulfat) und W5S (Alkylsulfonat) wiesen eine mittlere Löslichkeit auf. Bei geringen Zugabemengen war der größte Anteil löslich, bei hohen Konzentrationen wurde anscheinend die Löslichkeitsgrenze überschritten. Der Wirkstoff W3S (Alkylpolyglycoethersulfat) wies eine sehr gute Löslichkeit auch bei überhöhten Zugabemengen auf. Ursache hierfür ist Molekülstruktur. Die zusätzliche Glycoethergruppe verlängert die hydrophile polare Gruppe (s. Bild 5 in Teil 1) und verbessert damit die Löslichkeit des Wirkstoffs in der Porenlösung. Obwohl die polaren Gruppen reagieren und sich Calciumsalze bilden, hält die Glycoethergruppe den Wirkstoff in Lösung. Die Glycoethergruppe wirkt nach wie vor wie eine polare Gruppe und das hydrophob/hydrophile Verhalten des LP-Bildners bleibt erhalten, sodass die Moleküle Luftblasen stabilisieren können. Die Versuche zeigen, dass eine bessere Löslichkeit mit einer stärkeren Luftporenbildung verbunden ist.

5 Modellbildung

5.1 Wirkstoffbedingtes Nachaktivierungspotenzial

Um den Einfluss der Zusatzmittel auf die Luftporenbildung und das Nachaktivierungspotenzial näher zu charakterisieren, wurde der Luftgehalt der Mörtel in Abhängigkeit vom Vielfachen der Wirkstoff-Zugabemenge (einfach, zweifach, dreifach) und von der Mischdauer (30 Sekunden, zwei und sieben Minuten) dargestellt. Am Beispiel der drei Wirkstoffe W1N, W3S und W4S (Bild 13) und der damit hergestellten LP-Bildner LP1N, LP9S und LP10S (Bild 14) werden die Zusammenhänge exemplarisch erläutert. Der Wirkstoff W5S wurde nicht aufgeführt, da dessen Luftporenbildung dem Wirkstoff W4S vergleichbar ist. Es wird deutlich, dass mit den synthetischen Zusatzmitteln und dabei insbesondere mit dem Wirkstoff Alkylpolyglycoethersulfat (W3S) ein bestimmter Luftgehalt mit wesentlich geringeren Zugabemengen erreicht wird als dies mit den Zusatzmitteln auf natürlicher Wirkstoffbasis möglich ist. Zur Modellbildung wurden die Zusammenhänge zusätzlich schematisch in Bild 15 dargestellt.

Bei einer kurzen Mischdauer von 30 Sekunden verhielten sich alle Zusatzmittel unabhängig von der Zugabemenge annähernd gleichartig, wirkstoffspezifische Unterschiede wurden nicht festgestellt. Der Luftgehalt erhöhte sich trotz Verdreifachung der Zugabemenge nur geringfügig von rd. 4 auf rd. 7 Vol.-%. Mit zunehmender Mischdauer werden laufend neue Luftblasen in den Frischmörtel eingeführt und der Luftgehalt erhöht sich, bis kein gelöster Wirkstoff mehr in der Porenlösung vorhanden ist. Übertragen auf Praxisverhältnisse entspricht die Verlängerung der Mischdauer dem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in Beton, der mit verkürzter Mischdauer und überhöhter Zugabemenge hergestellt wurde. Das Ausmaß der Erhöhung des Luftgehalts gibt einen Anhalt über das Nachaktivierungspotenzial des LP-Bildners. Nach verlängerter Mischdauer von zwei bzw. sieben Minuten war in den Versuchen ein unterschiedliches wirkstoffbedingtes Verhalten der Zusatzmittel zu beobachten. Ursache der unterschiedlichen Luftporenbildung ist die Molekülstruktur der Wirkstoffe.

Bei allen im Untersuchungsprogramm einbezogenen Zusatzmitteln (sowohl handelsübliche LP-Bildner als auch reine Wirkstoffe) musste bei einer Verkürzung der Mischdauer (30 Sekunden) das Zusatzmittel überdosiert werden, um den gewünschten Luftgehalt von 5 Vol.-% zu erreichen (runder Punkt in Bild 15). Bei der kurzen Mischdauer wird eine im Vergleich zu längeren Mischdauern geringe Menge an Luftblasen in den Mörtel bzw. Beton eingeführt. Bereits mit einfacher Zugabemenge können die vorhandenen LP-Bildner-Moleküle einen großen Anteil der während

not all the air bubbles formed were able to attach themselves to cement particles and/or a larger proportion of the vinsol resin was precipitated.

4.4.3 Solubility/Precipitation of the active substance in calcium hydroxide solution

Comparison of the concentration of active substance introduced into the solution from the admixture with the concentration measured in the filtrate serves as a measure of the solubility of the admixture. The proportion of the active substance that is precipitated or dissolved is shown in Fig. 12 as a function of its N-times addition level. This shows a behaviour pattern of the admixture that is specific to the active substance. The natural active substance W1N exhibited a poor solubility over the entire concentration range. This is presumably because the individual molecules of active substance in the vinsol resin with its complex composition have different solubilities. The active substances W4S (alkyl sulfate) and W5S (alkyl sulfonate) exhibited moderate solubilities. The largest proportion was soluble at low addition levels, but the solubility limit was apparently exceeded at high concentrations. The active substance W3S (alkylpolyglycol ether sulfate) exhibited very good solubility, even at very high addition levels. The reason for this is the molecular structure. The additional glycol ether group extends the hydrophilic polar group (see Fig. 5), which improves the solubility of the active substance in the pore solution. Although the polar groups react and calcium salts are formed the glycol ether group keeps the active substance in solution. The glycol ether group continues to act as a polar group and the hydrophobic/hydrophilic behaviour of the air-entraining agent is retained, with the result that the molecules can stabilize air bubbles. The trials show that better solubility is linked to greater air void formation.

5 Modelling

5.1 Reactivation potential caused by the active substance

The air contents of the mortars in relation to the multiple of the quantity of active substance added (single, double, triple) and to the mixing time (30 seconds, two and seven minutes) are shown to provide more accurate characterization of the influence of the admixture on the air void formation and the reactivation potential. The relationships are explained using the example of the three active substances W1N, W3S and W4S (Fig. 13) and the air-entraining agents LP1N, LP9S and LP10S (Fig. 14) produced with them. The active substance W5S is not listed because its air void formation is similar to that of active substance W4S. It is clear that a specific air content can be achieved with substantially smaller addition levels of the synthetic admixtures, and particularly with the alkylpolyglycol ether sulfate active substance (W3S), than is possible with the admixtures based on natural active substances. The relationships are also shown diagrammatically in Fig. 15 for the modelling.

With a short mixing time of 30 seconds all the admixtures behaved similarly, regardless of the amount added, and no differences specific to the active substances were detected. In spite of tripling the addition level the air content increased only slightly from about 4 to about 7 vol. %. New air bubbles were introduced continuously into the fresh mortar with increasing mixing time and the air content rose until there was no more dissolved active substance present in the pore solution. When applied to practical conditions the extension of the mixing time corresponds to subsequent input of mixing energy into concrete that has been produced with shortened mixing time and increased addition level. The extent of the increase in air content provides an indication of the reactivation potential of the air-entraining agent. Differing behaviour patterns of the admixtures specific to the active substances were observed in the trials after extended mixing times of two or seven minutes. The reason for the differing air void formation lies in the molecular structures of the active substances.

For all the admixtures included in the investigative programme (both commercially available air-entraining agents and pure active substances) the amount of admix-

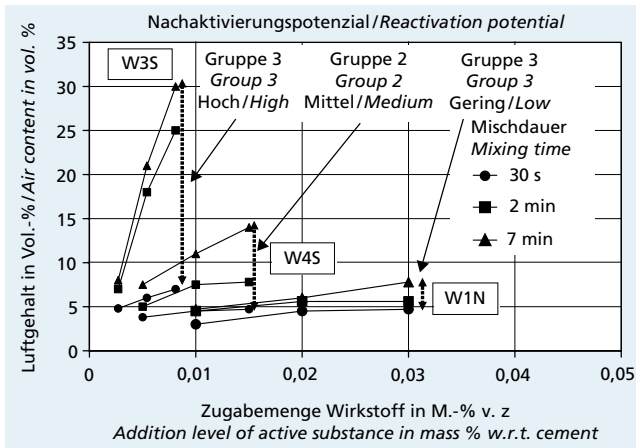


Bild 13: Luftgehalt in Abhängigkeit von der Zugabemenge des Wirkstoffs und der Mischdauer

Figure 13: Air content in relation to the addition level of active substance and to the mixing time

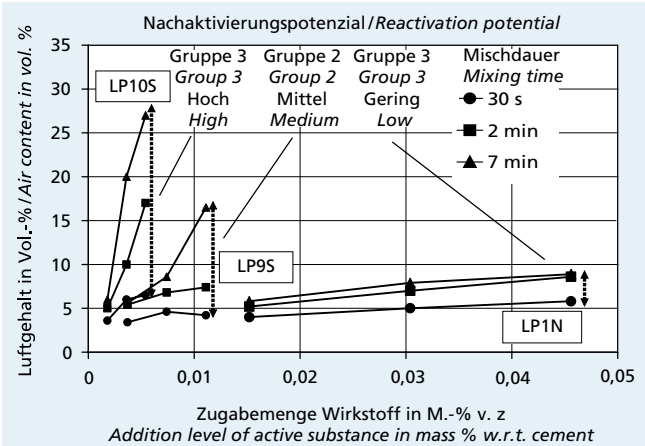


Bild 14: Luftgehalt in Abhängigkeit von der Zugabemenge des LP-Bildners (Wirkstoff) und der Mischdauer

Figure 14: Air content in relation to the addition level of air-entraining agent (active substance) and to the mixing time

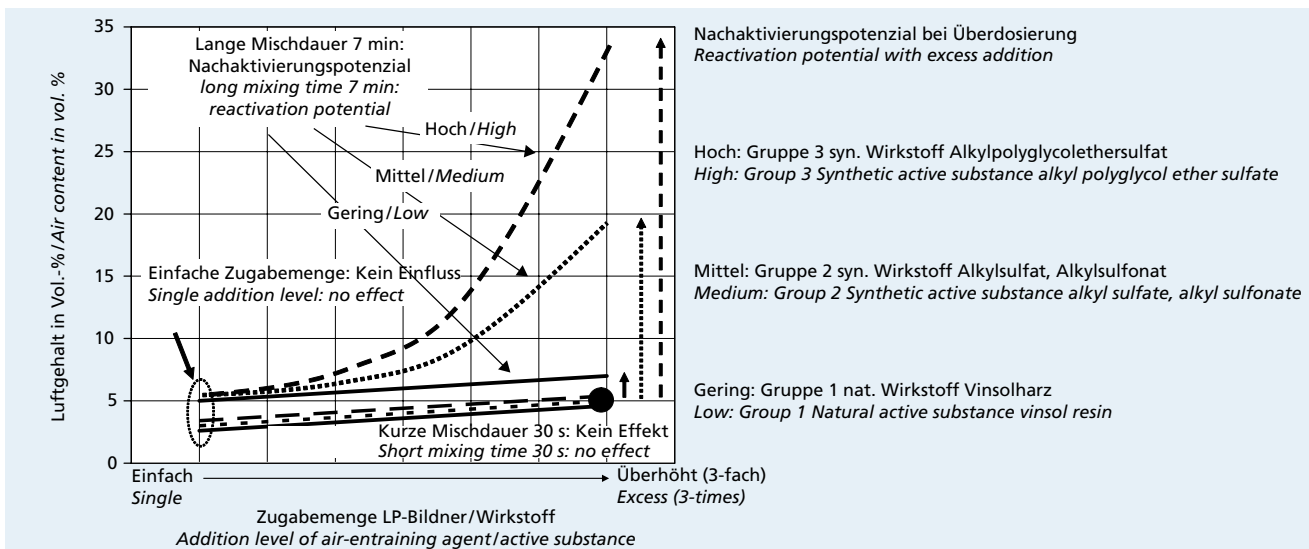


Bild 15: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Luftgehalts des Frischbetons von Wirkstoffart und Zugabemenge des Zusatzmittels und der Mischdauer sowie des wirkstoffabhängigen Nachaktivierungspotenzials

Figure 15: Diagrammatic representation of the dependence of the air content of the fresh concrete on the type of active substance and addition level of the air-entraining agent and mixing time as well as of the reactivation potential of the different active substances

der kurzen Mischdauer eingebrachten Luftblasen stabilisieren. Ein Überangebot an LP-Bildner infolge Überdosierung bewirkt bei verkürzter Mischdauer somit nur eine unterproportionale Erhöhung des Luftgehalts. Dies könnte z.B. durch eine bessere Mischwirkung des verwendeten Mixers kompensiert werden, durch die sowohl mehr Luftblasen erzeugt als auch die LP-Bildner-Moleküle schneller mit den Luftblasen in Kontakt gebracht werden. Bei verkürzter Mischdauer und Überdosierung treten somit keine nennenswerten wirkstoffbedingten Unterschiede in der Luftporenbildung auf. Ein Teil des überdosierten Zusatzmittels wird sorbiert, ein Teil fällt in der Porenlösung aus. Es verbleibt bei allen Zusatzmitteln nach einer verkürzten Mischdauer von 30 Sekunden im Vergleich zu einer langen Mischdauer (Zusatzmittel vollständig aktiviert) wirkstoffabhängig ein unterschiedlich großer Rest an nicht aktiviertem Zusatzmittel in der Porenlösung.

Der in der Porenlösung verbliebene Anteil ist bei dem Wirkstoff Alkylpolyglycolethersulfat W3S am größten. Bei den Wirkstoffen Alkylsulfat W4S und Alkylsulfonat W5S verbleibt ein mittlerer und bei den natürlichen Zusatzmitteln auf Vinsolharzbasis (W1N) nur ein geringer Anteil in Lösung. Überdosierter LP-Bildner allein

ture added had to be increased for a shortened mixing time (30 seconds) in order to achieve the required air content of 5 vol. % (round dot in Fig. 15). A smaller quantity of air bubbles is introduced into the mortar or concrete with the short mixing time than with longer mixing times. Even with the single addition level the available air-entraining agent molecules are able to stabilize a large proportion of the air bubbles introduced during the short mixing time. This means that with the shortened mixing time an oversupply of air-entraining agent resulting from an increased addition level produces only a disproportionately small increase in air content. This could be offset by, for example, an improved mixing action of the mixer used by which more air bubbles are generated and the air-entraining agent molecules are brought more rapidly into contact with the air bubbles. This means that with a shortened mixing time and increased addition level there are no appreciable differences in air void formation that are specific to the active substance. Part of the excess admixture added is sorbed and part is precipitated in the pore solution. With all the admixtures a varying quantity of residue, which depends on the active substance, remains in the pore solution in a non-activated state

beeinträchtigt zunächst nicht die Eigenschaften des erhärteten Betons. Wenn nun in den Frischbeton nachträglich Mischenergie eingebracht wird, können die während des Mischvorgangs in den Frischbeton eingeführten Luftblasen von LP-Bildnermolekülen stabilisiert werden und der Luftgehalt steigt an. Das Ausmaß dieses Anstiegs, das Nachaktivierungspotenzial, kann in Abhängigkeit der Wirkstoffbasis des LP-Bildners drei Gruppen zugeordnet werden (s. Bild 15).

Bei dem Wurzelharz fällt infolge der geringen Löslichkeit des entstehenden Calciumsalzes ein Großteil des überdosierten Zusatzmittels in der Porenlösung aus. Aufgrund der komplexen Molekülstruktur lagern sich außerdem nicht alle gebildeten Luftblasen an Feststoffpartikel an und können daher leicht aus dem Beton entweichen. Der Luftgehalt erhöht sich somit bei Überdosierung nur vergleichsweise gering von rd. 5 Vol.-% auf rd. 7 bis 8 Vol.-% und die Luftporenbildung ist nach kurzer Mischdauer abgeschlossen. LP-Betone mit LP-Bildnern auf Wurzelharzbasis weisen daher nur ein geringes Nachaktivierungspotenzial auf und sind der Gruppe 1 zuzuordnen.

Bei den besser löslichen synthetischen LP-Bildnern werden bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie fortlaufend Luftblasen stabilisiert, bis der überdosierte LP-Bildner aktiviert ist. Die Luftblasen können infolge der einfachen Molekülstruktur wirkungsvoll an Feststoffpartikel anheften, sodass ein stabiles Luftporengefüge entsteht. Eine nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts kann daher in der Baupraxis nur bei Verwendung synthetischer LP-Bildner auftreten. Das Nachaktivierungspotenzial kann in Abhängigkeit der Löslichkeit des Wirkstoffs differenziert werden. Im Fall des Alkylsulfats und des Alkylsulfonats bzw. den damit hergestellten LP-Bildnern mit einer mittleren Löslichkeit ergibt sich in den Laborversuchen bei verlängerten Mischdauern eine Erhöhung des Luftgehalts auf rd. 15 Vol.-%. Diese beiden Wirkstoffgruppen bzw. die damit hergestellten LP-Bildner weisen ein mittleres Nachaktivierungspotenzial auf und sind der Gruppe 2 zuzuordnen.

Die am besten in Porenlösung löslichen Wirkstoffe auf Alkylpolyglycolethersulfat-Basis werden nachträglich am stärksten aktiviert und erzeugen in den Laborversuchen einen hohen Luftgehalt von bis zu 35 Vol.-%. Diese Wirkstoffe weisen ein hohes Nachaktivierungspotenzial auf und sind der Gruppe 3 zuzuordnen. Die gute Löslichkeit wird durch die Verlängerung der polaren Gruppe der Moleküle durch die Ether-Einheiten verursacht.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Nachaktivierungspotenzial eines LP-Bildners in Mörtel oder Beton entscheidend durch die Wirkstoffbasis des verwendeten Luftporen bildenden Zusatzmittels beeinflusst wird. Betone, die mit einem LP-Bildner auf synthetischer Wirkstoffbasis der Gruppe 2 oder 3 hergestellt werden, haben ein mittleres oder sogar hohes nachträgliches Aktivierungspotenzial. Bei synthetischen Wirkstoffen besteht somit eine größere Gefahr, dass Anwendungsfehler, wie z.B. das Unterschreiten der vorgeschriebenen Mischdauer oder der Einsatz einer Mischanlage mit schlechter Mischwirkung, in Kombination mit einer Überdosierung des LP-Bildners bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie zu einem überhöhten Luftgehalt des Betons führen. Sie sind daher in dieser Hinsicht als weniger „robust“ zu bezeichnen. Bei den Zusatzmitteln der Gruppe 1 auf Vinsolharz-Basis ist infolge des geringen Nachaktivierungspotenzials keine wesentliche nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts zu befürchten. Sie reagieren daher kaum auf Anwendungsfehler und sind als wesentlich robuster anzusehen. Allerdings dürfte es mit diesen Zusatzmitteln im Allgemeinen auch schwieriger sein, den Luftgehalt anzuheben.

5.2 Einfluss von Betonzusammensetzung und Frischbetontemperatur

Das Nachaktivierungspotenzial eines Luftporenbetons ist vorrangig vom Wirkstoff des verwendeten LP-Bildners abhängig und bleibt auch i.d.R. bei veränderten Betonzusammensetzungen oder Frischbetontemperaturen erhalten. Durch geänderte Randbedingungen wird nur die für die Erreichung des angestrebten Luftgehalts erforderliche Zugabemenge des LP-Bildners beeinflusst, die

after a shortened mixing time of 30 seconds in contrast to a long mixing time when the admixture is fully activated.

The percentage remaining in the pore solution is greatest for the alkylpolyglycol ether sulfate active substance W3S. A moderate percentage remains in solution for the active substances W4S (alkyl sulfate) and W5S (alkyl sulfonate) and only a small percentage remains in solution for the natural admixture based on vinsol resin (W1N). Air-entraining agents added in increased amounts do not at first themselves have an adverse effect on the properties of the hardened concrete. However, if mixing energy is introduced subsequently into the fresh concrete the air bubbles introduced into the fresh concrete during the mixing process can be stabilized by the molecules of air-entraining agent and the air content rises. The extent of this rise – the reactivation potential – can be assigned to one of three groups depending on the active substance on which the air-entraining agent is based (see Fig. 15).

With wood resin most of the excess admixture is precipitated in the pore solution because of the low solubility of the calcium salt produced. The complex molecular structure also means that not all the air bubbles formed are attached to solid particles and they can escape easily from the concrete. This means that with increased addition levels the air content rises by a comparatively small amount from about 5 % to about 8 vol. % and the air void formation is completed after a short mixing time. The air-entrained concretes containing air-entraining agents based on wood resin therefore exhibit only a slight reactivation potential and are assigned to Group 1.

For the synthetic air-entraining agents with better solubilities the air bubbles are stabilized continuously during subsequent introduction of mixing energy until all the excess air-entraining agent is activated. Because of the simple molecular structure the air bubbles are able to attach themselves effectively to solid particles, resulting in a stable air void microstructure. In practice, a subsequent increase in air content can therefore only occur when synthetic air-entraining agents are used. The reactivation potential can differ depending on the solubility of the active substance. In the case of alkyl sulfate and alkyl sulfonate and the air-entraining agents produced with them with moderate solubilities an increase in air content to about 15 vol. % occurred in the laboratory trials with extended mixing times. These two groups of active substances and the air-entraining agents produced with them exhibit a moderate reactivation potential and are assigned to Group 2.

The active substances based on alkylpolyglycol ether sulfate that have the best solubilities in the pore solution exhibited the strongest subsequent activation and generated high air contents of up to 35 vol. % in the laboratory trials. These active substances have a high reactivation potential and are assigned to Group 3. The high solubility is caused by the extension of the polar groups of the molecules by the ether units.

The test results show that the reactivation potential of an air-entraining agent in mortar or concrete is influenced decisively by the active material on which the admixture that forms the air voids is based. Concretes that are produced with an air-entraining agent based on a synthetic active substance in Group 2 or 3 have a moderate or high reactivation potential. With synthetic active substances there is therefore a greater risk that mistakes in the application, such as a mixing time that is shorter than specified or the use of a mixing plant with poor mixing action combined with an increased addition level of the air entraining agent, will lead to an excessive air content of the concrete if there is subsequent input of mixing energy. In this respect they should therefore be designated as less “robust”. For the Group 1 admixtures based on vinsol resin the low reactivation potential means that there is no fear of any substantial subsequent increase in air content. They therefore hardly react to mistakes in the application and should be regarded as substantially more robust. However, in general it may also be more difficult to raise the air content with these admixtures.

5.2 Influence of concrete composition and fresh concrete temperature

The reactivation potential of an air-entrained concrete is primarily dependent on the active substance of the air-entraining agent used

entsprechend angepasst werden muss. Das Phänomen der nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts tritt vorrangig im Sommer auf. Die höhere Frischbetontemperatur erfordert eine wesentliche Steigerung der LP-Bildner-Zugabemenge. Bei LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis fällt bei einer Überdosierung der größte Anteil des Wirkstoffs aus und der Luftgehalt erhöht sich bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie nur unwesentlich. Bei Verwendung eines synthetischen LP-Bildners verbleibt im Vergleich zum Beton mit geringer Frischbetontemperatur ein größerer Anteil an nicht aktiviertem LP-Bildner in der Porenlösung. Bei einem Nachmischvorgang kann sich der Luftgehalt stärker erhöhen, sodass Probleme mit einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts bei synthetischen Tensiden häufiger an heißen Sommertagen auftreten. Die Nachaktivierung kann weiter verstärkt werden durch Randbedingungen, die ebenfalls eine Erhöhung der Zugabemenge des LP-Bildners erfordern, wie z.B. eine steifere Konsistenz, ein erhöhter Feinanteil des Gesteinskörnungsgemisches oder ein erhöhter Zementgehalt.

5.3 Einfluss auf das Luftporengefüge

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit allen geprüften Luftporen bildenden Zusatzmitteln anforderungsgerechte Luftporensysteme hergestellt werden können. Bei überhöhter Zugabemenge und verkürzter Mischdauer wird immer der Luftgehalt von 5 Vol.-% erreicht. Entfällt ein Nachmischvorgang, verbleibt überdosierter LP-Bildner im Beton, ohne dessen Eigenschaften zu beeinträchtigen. Die orientierend durchgeführten Untersuchungen zeigen aber, dass die Herstellung eines anforderungsgerechten Luftporensystems charakterisiert durch die LP-Kennwerte Abstandsfaktor und Mikro-Luftporengehalt eine ausreichend lange Mischdauer erfordert. Bei verkürzter Mischdauer und Überdosierung entsprach das entstehende Luftporengefüge trotz Einhaltung des Frischbeton-Luftgehalts vereinzelt nicht den Anforderungen. In diesem Fall besteht das Risiko eines verminderten Frost-Tausalz-Widerstands. Kommt es zu einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie, kann sich auch das gewünschte feine Luftporensystem ausbilden. Andererseits droht dann ein überhöhter Luftgehalt.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

6.1 Zusammenfassung

Bei einigen Betondeckenlosen wurde insbesondere bei Verwendung von LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis im Sommer ein stark erhöhter Luftporengehalt im Festbeton festgestellt. Eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts kann auftreten, wenn der LP-Bildner im Frischbeton infolge einer zu kurzen Mischdauer bei der Herstellung überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt zu erreichen. Der Frischbeton enthält dann nicht ausreichend aufgeschlossenen und aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton kann sich der Luftgehalt erhöhen. Die Wechselwirkungen zwischen Luftporen bildendem Wirkstoff, Mischdauer und Zugabemenge konnten jedoch in früheren Untersuchungen nicht genau ermittelt werden. Daher wurde hier die Luftporenbildung an Mörteln und Betonen, die Schaumbildung an Zementtossuspensionen, das Sorptionsverhalten mit Flotationsversuchen und an Zementleimen und die Ausfällung in Porenlösung untersucht.

An Mörteln und Betonen wurde die Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Wirkstoffart und der Zugabemenge des Zusatzmittels sowie von der Mischdauer bestimmt. In einem Vorversuch wurde die Zugabemenge von LP-Bildner bzw. Wirkstoff so festgelegt, dass bei einer Mischdauer von zwei Minuten ein Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% erzielt wurde (einfache Zugabemenge). Dabei konnten mit allen Zusatzmitteln Mörtel und Betone mit anforderungsgerechten Luftporensystemen erzeugt werden. Anschließend wurde die Mischdauerabhängige Luftporenbildung mit einfacher, doppelter und dreifacher Zugabemenge ermittelt. Bei allen Mitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis stieg der Luftgehalt bei Verdreifachung der Zugabemenge von 5 Vol.-% auf maximal rd. 8 Vol.-% an. Bei den synthetischen Tensiden war ein stärkerer Anstieg bei dreifacher Zugabemenge von 5 Vol.-% auf 15 Vol.-% bis 35 Vol.-% zu verzeichnen.

and is also as a rule maintained with altered concrete compositions or fresh concrete temperatures. Only the amount of air-entraining agent that is needed to achieve the target air content is affected by changed external conditions and has to be correspondingly adjusted. The phenomenon of subsequent increase in air content occurs mainly in summer. The higher fresh concrete temperature requires a substantial increase in the amount of air-entraining agent added. If there is increased addition of air-entraining agents based on natural active substances the majority of the active substance is precipitated and the air content is only increased slightly on subsequent input of mixing energy. If a synthetic air-entraining agent is used a larger proportion of non-activated air-entraining agent remains in the pore solution when compared with concrete with a lower fresh concrete temperature. The air content can increase quite sharply during a subsequent mixing process with the result that problems with subsequent increase in air content occur more frequently with synthetic tensides on hot summer days. The reactivation potential can be further increased by external conditions that also require an increase in the amount of air-entraining agent added, such as a stiffer consistency, an increased proportion of fines in the aggregate mix or an increased cement content.

5.3 Effect on the air void microstructure

The test results show that air void systems that meet the requirements can be produced with all the air-entraining admixtures tested. An increased addition level and shortened mixing time can always achieve an air content of 5 vol. %. If there is no subsequent mixing process then the excess air-entraining agent that has been added remains in the concrete without adversely affecting its properties. However, the preliminary investigations that were carried out show that the production of an air-void system that meets the requirements, characterized by the air void parameters of spacing factor and micro air void content, require a sufficiently long mixing time. With a shortened mixing time and increased addition level the resulting air void microstructure did not meet the requirements in all cases in spite of complying with the fresh concrete air content. In this case there is a risk of reduced resistance to freeze-thaw with deicing salt. The required fine air void system can be formed if there is a subsequent input of mixing energy. On the other hand, there is then the risk of excessive air content.

6 Summary and practical recommendations

6.1 Summary

A greatly increased air void content in the hardened concrete has been found in some contract sections of concrete pavement, especially when air-entraining agents based on synthetic active substances have been used in summer. A substantial increase in air-void content can occur if, to achieve the required air content, excess air-entraining agent has been added to the fresh concrete because of an excessively short mixing time during production. The fresh concrete may then not contain sufficient air-entraining agent that has been digested and activated. The air content may then increase when mixing energy is subsequently introduced into the fresh concrete. However, in earlier investigations it was not possible to make an accurate determination of the interactions between the air-entraining active substance, the mixing time and the addition level. The air void formation in mortars and concretes, the foam formation in cement suspensions, the sorption behaviour with flotation trials and on cement pastes and precipitation in the pore solution were therefore examined.

The air void formation in mortars and concretes was determined in relation to the type of active substance and addition level of the admixture and of the mixing time. The addition level of air-entraining agent or active substance was established in a preliminary trial so that an air content of about 5 vol. % was achieved with a mixing time of two minutes (single addition level). In this way it was possible to produce mortars and concretes with air void systems that met the requirements with all the admixtures. The air void formation was then measured in relation to mixing time with single, double and triple addition levels.

Das Schaumbildungsvermögen wurde an Zementsuspensionen in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge des Zusatzmittels bestimmt. Bei gleicher Wirkstoffkonzentration wiesen synthetische Wirkstoffe infolge der besseren Löslichkeit eine wesentlich stärkere Schaumbildung auf als die Zusatzmittel mit natürlicher Wirkstoffbasis. Dementsprechend fiel auch der größte Anteil des natürlichen Wirkstoffs in der Porenlösung aus. In Flotationsversuchen wurde die Wirkungsweise der Wirkstoffe weiter untersucht. Bei den synthetischen Wirkstoffen stieg mit zunehmender Zugabemenge der Anteil des flotierten Zements deutlich an, während bei den natürlichen Wirkstoffen nur ein sehr geringer Anstieg zu verzeichnen war. Um das Sorptionsverhalten zu untersuchen, wurde Zementleim mit Wirkstoff in unterschiedlichen Zugabemengen dotiert, abfiltriert und die Menge des am Zement sorbierten Wirkstoffs bestimmt. Im Sorptionsverhalten wurde kein Unterschied zwischen Wirkstoffen mit natürlicher bzw. synthetischer Wirkstoffbasis festgestellt. In Calciumhydroxid-Lösung fiel der überwiegende Teil des Vinsolharzes aus. Die synthetischen Wirkstoffe Alkylsulfat und -sulfonat wiesen eine mittlere und der synthetische Wirkstoff Alkylpolyglycolethersulfat die beste Löslichkeit auf. Auch bei hohen Zugabemengen fiel nur ein geringer Anteil dieses Wirkstoffs aus.

Aus den Versuchsergebnissen kann in Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung und der Molekülstruktur des Wirkstoffs ein wirkstoffbedingtes, drei Gruppen zuzuordnendes Nachaktivierungspotenzial abgeleitet werden. Das Nachaktivierungspotenzial von Zusatzmitteln mit natürlicher Wirkstoffbasis ist als gering zu bewerten (Gruppe 1). Ursache hierfür ist vor allem, dass der größte Anteil des Wirkstoffs in der Porenlösung ausfällt. Eine wesentliche nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts ist nur bei synthetischen Tensiden zu erwarten. Wirkstoffe auf der Basis eines Alkylsulfats oder -sulfonats weisen infolge der besseren Löslichkeit ein mittleres Nachaktivierungspotenzial auf und sind der zweiten Gruppe zuzuordnen. Zusatzmittel auf der Basis eines Alkylpolyglycolethersulfats weisen die beste Löslichkeit auf, sodass überdosierter LP-Bildner zu einem hohen Anteil aktiv in der Porenlösung verbleibt. Das Nachaktivierungspotenzial ist hoch und der Gruppe 3 zuzuordnen. Ursache der guten Löslichkeit ist die Molekülstruktur. Die Länge der polaren Gruppe verbessert die Löslichkeit.

6.2 Empfehlungen für die Praxis

Mit synthetischen LP-Bildnern lassen sich ebenso wie mit natürlichen LP-Bildnern anforderungsgerechte Luftporensysteme erzeugen. Unter bestimmten Randbedingungen bietet die Verwendung eines synthetischen LP-Bildners Vorteile. Die synthetischen Mittel erbringen den geforderten Luftgehalt infolge der guten Löslichkeit schon bei sehr geringen Wirkstoff-Zugabemengen. Vergleichsweise geringe Dosierungsänderungen bewirken aber eine starke Veränderung des Luftporengehalts. Bei einer Überdosierung in Verbindung mit einer verkürzten Mischdauer weisen Betone mit synthetischen LP-Bildnern ein größeres Nachaktivierungspotenzial auf als Betone mit natürlichen LP-Bildnern. Daher kann bei

With all the admixtures based on natural substances the air content when the quantity added was tripled increased from 5 vol. % to a maximum of about 8 vol. %. With the synthetic tensides a sharper increase from 5 vol. % to 15–35 vol. % was recorded when the addition level was tripled.

The foam-forming ability was determined on cement suspensions in relation to the type and addition level of the admixture. For the same concentration of active substance the synthetic active substances, because of their better solubility, exhibited substantially greater foam formation than the admixtures based on natural active substances. Most of the natural active substance precipitated in the pore solution. The mode of operation of the active substances was investigated further in flotation trials. With the synthetic active substances the proportion of cement that floated increased significantly with increasing addition level, while only a slight increase was recorded with the natural active substances. In order to investigate the sorption behaviour different quantities of active substance were added to cement paste, which was then filtered off and the quantity of active substance sorbed on the cement was measured. No differences in sorption behaviour were found between admixtures based on natural and on synthetic active substances. Most of the vinsol resin precipitated in calcium hydroxide solution. The synthetic active substances alkyl sulfate and alkyl sulfonate exhibited moderate solubility and the synthetic active substance alkyl polyglycol ether sulfate exhibited the best solubility. Only a small proportion of this active substance was precipitated, even at high addition levels.

Reactivation potentials divided into three groups based on the active substance can be derived from the test results on the basis of the chemical composition and molecular structure of the active substance. The reactivation potential of admixtures based on natural active substances is evaluated as low (Group 1). The reason for this is mainly that most of the active substance precipitates in the pore solution. A substantial subsequent increase in the air content is only to be expected with synthetic tensides. Because of their better solubilities the active substances based on alkyl sulfates or alkyl sulfonates exhibit a moderate reactivation potential and are allocated to the second group. Admixtures based on alkyl polyglycol ether sulfate have the best solubility, with the result that a large proportion of the air-entraining agents that have been added in excess remains active in the pore solution. The reactivation potential is high and is allocated to Group 3. The reason for the good solubility is the molecular structure. The length of the polar group improves the solubility.

6.2 Practical recommendations

Air void systems that meet the requirements can be generated with synthetic air-entraining agents as well as with natural air-entraining agents. Under certain conditions the use of a synthetic air-entraining agent has some advantages. Because of its good solubility the synthetic admixture produces the required air content even at very low addition levels of the active substance. However, comparatively small changes in the addition level result in sharp changes in the air void content. With an excessive addition level combined with a shortened mixing time the concretes containing synthetic air-entraining agents have a greater reactivation potential than concretes containing natural air-entraining agents. This means that with synthetic air-entraining agents the air content can increase if there is a subsequent input of mixing energy into the fresh concrete. Concretes containing synthetic tensides therefore react more sensitively to application errors (e.g. shortening of the mixing time) than concretes containing air-entraining agents based on vinsol resin.

During the initial testing it is possible to use a supplementary test to check whether a subsequent increase in air content can occur during the construction work (Fig. 16). The addition level of air-entraining agent determined in the initial testing must be doubled and the air content in the mixes must be measured with both addition levels after a short mixing time (30 seconds) and after an extended mixing time (six minutes). If there is a substantial increase in the air content with the doubled addition level and extended mixing time then

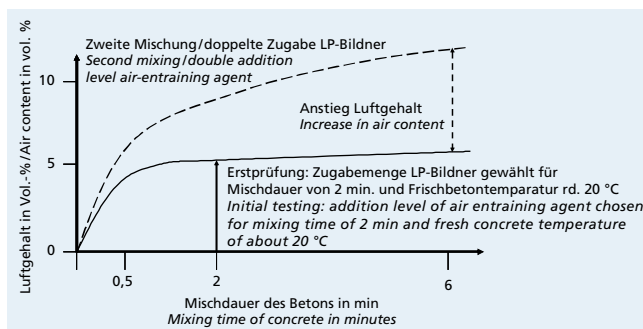


Bild 16: Prüfung des Nachaktivierungspotenzials einer Betonzusammensetzung bei der Erstprüfung im Labor

Figure 16: Checking the reactivation potential of a concrete composition during the initial testing in the laboratory

synthetischen LP-Bildnern bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton der Luftgehalt ansteigen. Betone mit synthetischen Tensiden reagieren daher auf Anwendungsfehler (z.B. Verkürzung der Mischdauer) empfindlicher als Betone mit LP-Bildnern auf Vinsolharzbasis.

Ob möglicherweise während der Bauausführung eine nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts auftritt, kann mit einem Zusatzversuch bereits bei der Erstprüfung überprüft werden (Bild 16). Dabei muss die in der Erstprüfung ermittelte LP-Bildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden Zugabemengen nach einer kurzen Mischdauer (30 Sekunden) und nach einer verlängerten Mischdauer (sechs Minuten) bestimmt werden. Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischdauer besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer Erhöhung des Luftgehalts.

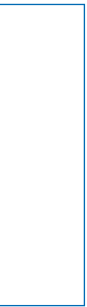
Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

there is a danger of increased air content during the construction work.

The research project was supported by funds from the Federal Ministry for Economic Affairs and Technology through the “Otto von Guericke” Federation of Industrial Research Associations.

Literatur / Literature

- [1] Eickschen, E.; Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenbildung im Straßenbeton. Straße und Autobahn 52 (2001) H. 9, S. 517/521
- [2] Eickschen, E.: Einflüsse auf die Luftporenbildung in Straßenbeton. beton 53 (2003) H. 5 und 6, S. 265/270 und S. 321/326
- [3] Eickschen, E.: Working mechanisms of air-entraining agents. 10th International Symposium on Concrete Roads, Brussels, Belgium 2006
- [4] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen von Luftporen bildenden Zusatzmitteln. beton 57 (2007) H. 9, S. 417–422
- [5] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 73, Verlag Bau und Technik, Duesseldorf 2009
- [6] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004
- [7] Bruere, G. M.: Fundamental actions of air-entrained agents. International Symposium on Admixtures for Mortar and Concrete, Topic III, S. 7–23, August 8th–September 1st 1967, Brussels 1967
- [8] Deutsche Bauchemie e.V.: Betonzusatzmittel und Umwelt. Sachstandsbericht Mai 1999.
- [9] Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P.: Chemical Admixtures for Concrete. 2nd Edition, E. & F.N. Spon, London (1986)
- [10] Bruere, G. M.: Air entrainment in Cement and Silica pastes. ACI Journal 51 (1954/55), S. 905/919
- [11] Mielenz, R. C.; Wolkodoff, V. E.; Backstrom, J. E.; Wheeler, W. H.: Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete. Part 1 – Entrained Air in Unhardened Concrete. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No. 1, July 1958, S. 95/121
- [12] Backstrom, J. E.; Burrows, R. W.; Mielenz, R. C.; Wolkodoff, V. E.: Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete. Part 2 – Influence of Type and Amount of Air-Entraining Agent. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No. 2, Aug. 1958, S. 261/272
- [13] Schwuger, M. J.: Zur Wirkungsweise von Tensiden in technischen Prozessen. Chemie-Ing. Technik 44 (1972) H. 6, S. 374/378
- [14] Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P.: Chemical Admixtures for Concrete. 2nd Edition, E. & F.N. Spon, London (1986)
- [15] Venuat, M.: Adjuvants et Traitements. Selbstverlag 1984
- [16] Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 45 (1995) H. 10, S. 724/730
- [17] Herstellen von Luftporenbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 68 (2002) H.1, S. 46/52
- [18] Kottas, R.; Hilsdorf, H.: Der Einfluss der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, H. 274, Bonn 1979
- [19] Reul, H.: Handbuch Bauchemie. Verlag für chemische Industrie, H. Ziolkowsky KG, Augsburg 1991



Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf

Zusammenwirken von Luftporenbildner und Fließmittel in Beton

Interactions of air-entraining agents and plasticizers in concrete

Übersicht

Aus der Praxis wurde über Probleme bei der Herstellung von Luftporenbeton berichtet, insbesondere wenn Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatethern (PCE) verwendet wurden. Der Luftgehalt insgesamt schwankte und vereinzelt wurden trotz Einhaltung des Luftgehalts im Frischbeton die am Festbeton ermittelten Anforderungen an die LP-Kennwerte nicht erreicht. Die zielsichere Einstellung des Mikro-Luftporengefüges, das Frost- und Frost-Tausalzschäden verhindert, ist somit nicht mehr gegeben. In einem Forschungsvorhaben wurde untersucht, inwieweit Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildner und Fließmittel die Luftporenbildung beeinflussen. Dabei wurde die Luftporenbildung an Mörtel und Beton mit unterschiedlichen Zusatzmittelkombinationen und Zementen erforscht. Ziel war die anforderungsgerechte Herstellung von Luftporenbeton unter Verwendung von Fließmittel durch Identifikation „robuster“ LP-Bildner/Fließmittel-Kombinationen, die die Luftporenbildung nicht beeinträchtigen. Zur Erklärung der Wechselwirkungen wurde ein Modell erarbeitet und daraus Empfehlungen abgeleitet. Die Versuche zeigen, dass die Zugabereihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel und die Wirkstoffbasis des LP-Bildners die Luftporenbildung stark beeinflussen können. Zusatzmittelkombinationen mit einem LP-Bildner auf natürlicher Wirkstoffbasis verhalten sich „robuster“ als Kombinationen mit synthetischen LP-Bildnern.

1 Einleitung

Für Betone der Expositionsclassen XF2 und XF3 mit einem w/z-Wert von 0,55 und für Beton in der Expositionsklasse XF4 ist die Verwendung eines Luftporenbildners zum Erreichen eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands vorgeschrieben. Um den Beton länger und leichter verarbeiten zu können, werden Verflüssiger bzw. Fließmittel eingesetzt. Aus der Praxis wurde über Probleme bei der Herstellung von LP-Beton berichtet, insbesondere, wenn Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatethern (PCE) verwendet wurden. Der Luftgehalt insgesamt schwankte und vereinzelt wurden trotz Einhaltung des Gesamtluftgehalts im Frischbeton

Abstract

There have been reports of problems that have arisen in practice during the production of air-entrained concrete when using plasticizers, especially those based on polycarboxylate ether (PCE). The total air content fluctuated and in individual cases the requirements for the air void parameters measured on the hardened concrete were not met in spite of the fact that the total air content of the fresh concrete complied with the requirements. The dependable adjustment of the micro air void structure, which prevents damage by freeze-thaw with or without de-icing salt is no longer possible. The extent to which interactions between air-entraining agent and plasticizer can affect the air void microstructure was investigated in a research project. The formation of air voids was tested in mortar and concrete with different combinations of admixtures and cements. The aim was to manufacture appropriate air-entrained concrete containing plasticizers by identifying “robust” admixture combinations that reduces the risk of unwanted air void formation. The interrelationships were incorporated in a model which makes it possible to give recommendations. The sequence of addition of air-entraining agent and plasticizer and the active agent of the air-entrainer have a decisive influence on the air void formation. Admixture combinations of air-entraining agent and plasticizer containing air-entraining agents based on natural active substances are considered more “robust” than variants with synthetic air-entraining agents.

1 Introduction

The use of an air-entraining agent to achieve adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt is stipulated for concretes of exposure classes XF2 and XF3 with a w/c ratio of 0.55 and for concrete in exposure class XF4. Water-reducer or plasticizers are used so that the concrete can be worked longer and more easily. There have been reports of problems that have arisen in practice during the production of air-entrained concrete, especially when using plasticizers based on polycarboxylate ether (PCE). The total air content fluctuates and in individual cases the requirements for the air void

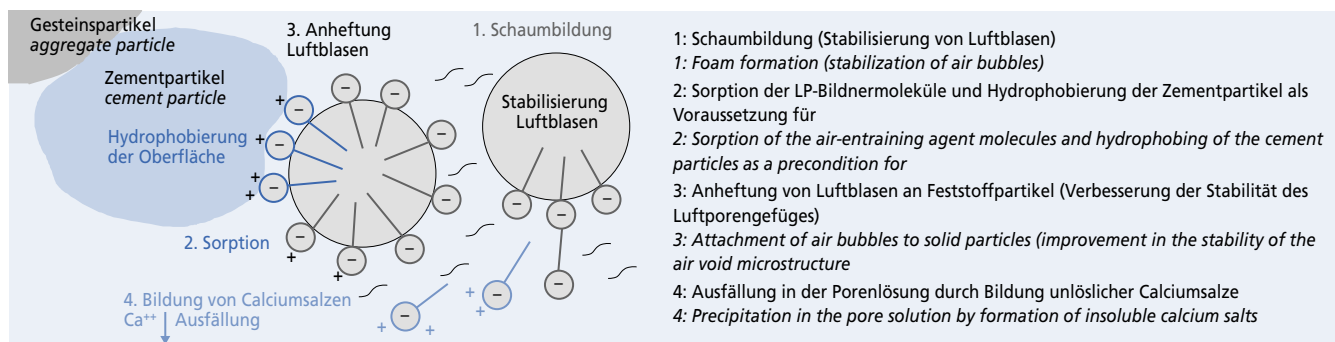


Bild 1: Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung
Figure 1: Action mechanisms of air void formation

die am Festbeton ermittelten Anforderungen an die LP-Kennwerte nicht erreicht. Damit ist die zielsichere Einstellung des Mikro-Luftporengefüges, das Frost- und Frost-Tausalzschäden verhindert, nicht mehr gegeben. Bisher fehlten systematische Untersuchungen zu den Wirkungsmechanismen bei der gleichzeitigen Verwendung von Fließmitteln auf der Basis von PCE und LP-Bildnern. Daher wurde in einem Forschungsvorhaben untersucht, inwieweit Wechselwirkungen zwischen LP-Bildnern und Fließmitteln in Abhängigkeit von der Wirkstoffbasis der Zusatzmittel und des Zements die Luftporenbildung beeinflussen. Die Kenntnis der Zusammenhänge ermöglicht es, robuste Zusatzmittelkombinationen gezielt auszuwählen und das Risiko einer unerwünschten Luftporenbildung zu verringern.

2 Stand der Kenntnis

2.1 Luftporenbildner

Zur Erzielung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands muss dem Beton i.d.R. ein LP-Bildner zugegeben werden, der im Frischbeton viele kleine gleichmäßig verteilte Luftporen mit einem Durchmesser $\leq 300 \mu\text{m}$ erzeugt. Als Grundstoffe für LP-Bildner haben sich Seifen aus natürlichen Harzen (Wurzelharze) und synthetische Rohstoffe (Alkylpolyglycolethersulfate, Alkylsulfate und -sulfonate) bewährt [1, 2]. LP-Bildner gehören zu den grenzflächenaktiven Substanzen, den so genannten Tensiden. Die gemeinsame Charakteristik der Tenside ist ihr hydrophob/hydrophiler Molekulaufbau. Sie bestehen aus einer unpolaren, hydrophoben verzweigten oder unverzweigten Kohlenwasserstoffkette mit 8 bis 12 Kohlenstoffatomen und einer hydrophilen polaren Carboxyl-, Sulfat- oder Sulfonatgruppe. LP-Bildner bestehen selten aus reinen Grundstoffen, sondern sind häufig Gemische verschiedener Ausgangsstoffe [2].

Die im Zementleim gelösten LP-Bildner-Moleküle stabilisieren die durch das Mischen in den Beton eingetragenen Luftblasen. Der polare hydrophile Teil ragt dabei in das Wasser (bzw. den Zementleim, Bild 1) hinein, während der langkettige hydrophobe Teil in der Luftblase liegt. Andere Moleküle werden mit der negativ geladenen polaren Gruppe an positiv geladene Teilbereiche der Zement- oder Gesteinskörnungspartikel sorbiert. Dadurch können sich Luftblasen an Feststoffpartikel anheften und die Stabilität des Luftporensystems wird verbessert [3]. Ein weiterer Teil des LP-Bildners fällt in der Porenlösung aus. Während des Mischens werden laufend neue Luftblasen stabilisiert. Der Luftgehalt steigt an, bis kein gelöster LP-Bildner mehr in der Porenlösung vorliegt. Infolge der guten Löslichkeit synthetischer LP-Bildner ist bei hohen Zugabemengen eine längere Mischdauer notwendig, um den Wirkstoff vollständig zu aktivieren. LP-Bildner auf natürlicher Wirkstoffbasis fallen zum Großteil in der Porenlösung aus und sind daher auch bei hohen Zugabemengen nach kurzer Mischdauer aktiviert [3].

2.2 Fließmittel

Bei den Fließmitteln wird zwischen klassischen Fließmitteln (Melamin-, Naphthalin- und Ligninsulfonatbasis) und Polycarboxylatethern (PCE) unterschieden. Die verflüssigende Wirkung ist von der Sorption der negativ geladenen Fließmittelmoleküle an positiv geladenen Bereichen der Zementoberfläche bzw. ersten Hydratationsprodukten abhängig. Während die Wirkung der klassischen Fließmittel auf einer elektrostatischen Abstoßung beruht, bewirken PCE zusätzlich eine räumliche (sterische) Trennung der Zementpartikel. Beides vermindert die Agglomeratbildung der Zementkörner und anderer feiner Feststoffpartikel. Die Wirkstoffe der klassischen Fließmittel weisen eine hohe Ladungsdichte auf und sorbieren innerhalb kurzer Zeit stark an Feststoffpartikel. Im Gegensatz zu klassischen Fließmitteln verfügen PCE über eine definierte Anzahl von Seitenketten, die entlang einer Hauptkette verteilt sind. Durch Variation der Ladungsdichte sowie der Länge der Hauptkette bzw. Seitenketten kann die Sorption der PCE gezielt verändert werden, wodurch eine starke Anfangsverflüssigung bzw. eine längere Verarbeitungszeit des Betons erreicht werden kann [4–6]. PCE können daher an die jeweiligen Einsatzbedingungen (z.B. Zement, Frischbetontemperatur) angepasst werden. Veränderte Randbedingungen können jedoch die Wirksamkeit des PCE und die Verarbeitungszeit des Betons beeinflussen.

parameters measured on the hardened concrete are not met in spite of the fact that the total air content in the fresh concrete complies with the requirements. This means that dependable adjustment of the micro air void structure, which prevents damage by freeze-thaw with or without de-icing salt, is no longer possible. So far there have been no systematic investigations into the action mechanisms that occur during simultaneous use of PCE-based plasticizers and air-entraining agents. The extent to which interactions between air-entraining agents and plasticizers affect the air void formation was therefore investigated in a research project in relation to the cement and the basis of the active substance in the admixture. An understanding of the interrelationships permits carefully controlled selection of robust admixture combinations and a reduction in the risk of unwanted air void formation

2 Current state of knowledge

2.1 Air-entraining agents

It is usually necessary to add an air-entraining agent, which generates a large number of small, evenly distributed, air voids with diameters $\leq 300 \mu\text{m}$, to concrete to achieve adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt. Soaps made from natural resins (wood resins) and synthetic raw materials (alcohol polyglycol ether sulfates, alkyl sulfates and sulfonates) have proved successful basic materials for air-entraining agents [1, 2]. Air-entraining agents belong to the group of surface-active substances, so-called tensides. The common characteristic of tensides is their hydrophobic/hydrophilic molecular structure. They consist of a non-polar, hydrophobic, branched or unbranched, hydrocarbon chain with 8 to 12 carbon atoms and a hydrophilic polar carboxyl, sulfate or sulfonate group. Air-entraining agents seldom consist of pure basic materials and are often mixtures of different starting materials [2].

The molecules of air-entraining agent dissolved in the cement paste stabilize the air bubbles introduced into the concrete by the mixing process. The polar hydrophilic part projects into the water (or the cement paste, Fig. 1) while the long-chain hydrophobic part lies in the air bubble. Other molecules are sorbed with the negatively charged polar group on positively charged parts of the cement or aggregate particle. This enables the air bubbles to attach themselves to solid particles and the stability of the air void system is improved [3]. Some of the rest of the air-entraining agent is precipitated in the pore solution. New air bubbles are stabilized continuously during the mixing. The air content rises until there is no more dissolved air-entraining agent in the pore solution. The good solubility of synthetic air-entraining agents means that a longer mixing time is necessary with high addition levels to fully activate the active substance. Air-entraining agents based on natural active substances are very largely precipitated in the pore solution and are therefore activated after a short mixing time, even with high addition levels [3].

2.2 Plasticizers

With plasticizers a distinction is made between classical plasticizers (based on melamine, naphthalene and lignin sulfonates) and polycarboxylate ethers (PCEs). The plasticizing action is dependent on sorption of the negatively charged plasticizer molecules on positively charged areas of the cement surface or initial hydration products. The action of the classical plasticizers is based on electrostatic repulsion but PCEs also cause a spatial (steric) separation of the cement particles. Both of them reduce the formation of agglomerates of cement particles and other fine solid particles. The active substances in classical plasticizers have a high charge density and are strongly sorbed onto solid particles in a short time. In contrast to classical plasticizers, PCEs have specific number of side chains that are distributed along a main chain. The sorption of the PCEs can be selectively altered by varying the charge density and the lengths of the main and side chains, so that a strong initial plasticizing effect or a longer workability of the concrete can be achieved [4–6]. PCEs can therefore be adapted to particular conditions of use (e.g. cement, fresh concrete temperature). However, changed marginal conditions can influence the effectiveness of the PCE and the workability time of the concrete.

2.3 Kombinierte Zugabe von LP-Bildner und Fließmittel

Der Gehalt an kleinen Poren wird mit der Bestimmung des Mikro-Luftporengehalts und des Abstandsfaktors am Festbeton beurteilt. Um einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand zu gewährleisten, muss in der Erstprüfung der Mikro-Luftporengehalt mindestens 1,8 Vol.-% betragen und der Abstandsfaktor darf 0,20 mm nicht überschreiten [7]. Bei Bauwerksprüfungen werden etwas geringere Anforderungen gestellt (Tafel 1). Beide Kennwerte werden in einer aufwendigen Prüfung am erhärteten Beton ermittelt. Der Beton enthält i.d.R. einen ausreichenden Gehalt an kleinen Poren, wenn die Anforderungen an den am Frischbeton ermittelten Gesamtluftgehalt eingehalten werden. Bei der gleichzeitigen Verwendung von LP-Bildner und Fließmittel können je nach Art und Menge der Zusatzmittel Wechselwirkungen zwischen beiden Zusatzmittelarten auftreten, die die Luftporenbildung beeinträchtigen [8, 9]. Als Folge weisen diese Betone bei gleichem Gesamtluftgehalt wie steife Betone einen geringeren Gehalt an kleinen Luftporen $\leq 300 \mu\text{m}$ auf [9]. Als Ursache werden die im Fließmittel enthaltenen Entschäumer genannt. Zusätzlich können die negativen Ladungen von LP-Bildner und Fließmittel Konkurrenzreaktionen um Sorptionsstellen an Zementpartikeln bewirken. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass weiche LP-Betone bei gleichem Gesamtluftgehalt mit und auch ohne Fließmittel-Zugabe bereits herstellungsbedingt mehr große Luftporen enthalten als steife Betone. Dies liegt daran, dass die beim Mischen eingeführten Luftporen nicht wie bei steifen Betonen während des Mischvorgangs zerteilt werden [12]. Um den Frost-Tausalz-Widerstand zu gewährleisten, wird der Gesamtluftgehalt von weichen LP-Betonen und von LP-Betonen, die Verflüssiger oder Fließmittel enthalten, durch eine höhere Dosierung des LP-Bildners um 1 Vol.-% angehoben. Wenn bei der Erstprüfung nachgewiesen wird, dass die Grenzwerte für die LP-Kennwerte eingehalten werden, ist dieses Vorhaltemaß nicht erforderlich und es gilt ein um 1 Vol.-% niedrigerer Luftgehalt. Bei der Ausbreitmaßklasse F6 sind die LP-Kennwerte immer nachzuweisen [7]. Zusätzlich muss bei der gleichzeitigen Verwendung eines LP-Bildners und eines Fließmittels/Verflüssigers mit einer Wirksamkeitsprüfung nachgewiesen werden, dass mit der gewählten Kombination im Festbeton ein Abstandsfaktor $\leq 0,20 \text{ mm}$ und ein Mikro-Luftporengehalt von $\geq 1,5 \text{ Vol.-%}$ erzielt wird.

Darüber hinaus beeinflusst die Zugabereihenfolge der Zusatzmittel die Luftporenbildung. Wird zuerst Fließmittel und dann LP-Bildner zugegeben, wird das Luftporensystem in einem weichen Beton gebildet, wodurch ein gröberes Luftporensystem entsteht. Zudem sind bereits Sorptionsplätze an Zementpartikeln durch Fließmittelmoleküle besetzt, sodass LP-Bildner in geringerem Ausmaß sorbiert wird. Es besteht die Gefahr, dass Luftblasen nicht an Feststoffpartikel anheften und während des Verdichtungs-vorgangs aus dem Beton entweichen, sodass insgesamt ein instabiles Luftporensystem entsteht. In der Praxis wird daher zuerst LP-Bildner und dann Fließmittel zugegeben. Die Wirksamkeit der Zusatzmittel und damit die Luftporenbildung wird von zahlreichen Faktoren wie z.B. der Betonzusammensetzung, der Betonherstellung, der Frischbetontemperatur und der Konsistenz des Betons beeinflusst [10, 11]. Um die unterschiedlichen Parameter zu berücksichtigen, wird die Zugabemenge der Zusatzmittel in der Erstprüfung festgelegt und ggf. während der Bauausführung an die baupraktischen Verhältnisse angepasst.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ziel und Umfang der Versuche

Die Kenntnis der Wirkungsmechanismen bei der Herstellung von LP-Beton mit Fließmittel verringert das Risiko von Fehlanwendungen. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) wurde daher untersucht, inwieweit Wechselwirkungen zwischen LP-Bildner, Fließmittel und Zement die Luftporenbildung beeinflussen können. Um eine ggf. entschäumende Wirkung nachzuweisen, wurden in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination Feinbetone (Größtkorn 4 mm) mit definiertem Luftgehalt hergestellt und anschließend Fließmittel in mehreren Stufen zugegeben. Nach jeder Teilzugabe wurden Luftgehalt und Konsistenz des Betons bestimmt.

Tafel 1: Anforderungen an die Luftporenkennwerte in Abhängigkeit von der Prüfung [7]

Table 1: Requirements for the air void parameters in relation to the test [7]

Art der Prüfung <i>Type of testing</i>	Anforderung an / Requirements for	
	Abstandsfaktor in mm <i>Spacing factor in mm</i>	Mikro-Luftporengehalt in Vol.-% <i>Micro air void content in vol. %</i>
Erstprüfung <i>Initial testing</i>	0,20	1,8
Bauteilprüfung <i>Component testing</i>	0,24	1,5
Wirksamkeitsprüfung <i>Effectiveness testing</i>	0,20	1,5

2.3 Combined addition of air-entraining agent and plasticizer

The content of small voids is assessed by determining the micro air void content and the spacing factor in the hardened concrete. To ensure adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt the micro air void content must be at least 1.8 vol. % in the initial testing and the spacing factor must not exceed 0.20 mm [7]. Somewhat lower requirements are set when testing structures (Table 1). Both parameters are determined in an elaborate test on the hardened concrete. As a rule the concrete will have an adequate content of small voids if the requirements for the total air content measured on the fresh concrete are met. If air-entraining agents and plasticizers are used simultaneously then, depending on type and quantity of the admixtures, there may be interactions between the two types of admixture that adversely affect the formation of air voids [8, 9]. As a consequence these concretes will have a lower content of small air voids $\leq 300 \mu\text{m}$ than stiff concretes for the same total air content [9]. The de-foaming agents contained in the plasticizer have been cited as the cause. The negative charges on the air-entraining agents and plasticizers can also cause competing reactions at the sorption sites on cement particles. It also has to be borne in mind that for the same total air content the soft air-entrained concretes (with or without the addition of plasticizers) already contain more large air voids than stiff concretes due to the nature of the production process. This is because the air voids introduced during the mixing are not split up in the same way as when stiff concretes are mixed [12]. The total air content of soft air-entrained concretes and of air-entrained concretes that contain wetting agents or plasticizers is increased by 1 vol. % by increased addition of the air-entraining agent in order to ensure the resistance to freeze-thaw with de-icing salt. If it is proved during the initial testing that the air-entraining parameters comply with the limits then this safety margin is not necessary and a 1 vol. % lower air content is used. The air-entraining parameters always have to be verified for the F6 flow table spread class [7]. With simultaneous use of an air-entraining agent and a plasticizer/wetting agent an effectiveness test must also be used to show that the chosen combination achieves a spacing factor of $\leq 0.20 \text{ mm}$ and a micro air void content of $\geq 1.5 \text{ vol. %}$ in the hardened concrete.

The sequence in which the admixtures are added also affects the air void formation. If the plasticizer is added first, followed by air-entraining agent, then the air void system is formed in a softer concrete, which results in a coarser air void system. Sorption sites on the cement particles are also already occupied by plasticizer molecules, so less air-entraining agent is sorbed. There is the danger that air bubbles will not be attached to solid particles and will escape from the concrete during the compaction process, resulting in an unstable air void system. In practice the air-entraining agent is therefore added first, followed by the plasticizer. The effectiveness of the admixtures, and therefore the air void formation, is affected by numerous factors, such as concrete composition, concrete production, fresh concrete temperature and consistency of the concrete [10, 11]. In order to take the various parameters into

Tafel 2: Übersicht über die verwendeten Fließmittel und LP-Bildner (Konzentrate)
Table 2: Overview of the plasticizers and air-entraining agents (concentrates) used

Zusatzmittel Admixture	Hersteller 1 Producer 1	Hersteller 2 Producer 2	Hersteller 3 Producer 3
PCE Transportbeton PCE ready-mixed concrete	1 PCE (30.3) ¹⁾	1 PCE (19.9)	1 PCE geeignet für beide Anwendungsbereiche (17.9) 1 PCE suitable for both areas of application
PCE Fertigteil PCE precast element	1 PCE (30.3)	1 PCE (29.1)	
Herkömm. Fließmittel Conventional plasticizer	Naphthalinsulfonat (39.7) Naphthalene sulfonate	Melaminsulfonat (20.2) Melamine sulfonate	–
LP-Bildner Air-entraining agent	Wurzelharzseife (16.6) Wood resin soap	Modifiziertes Wurzelharz (19.4) Modified wood resin	Synthetisches Tensid 1 (7.9) Synthetic tenside 1

¹⁾ Werte in Klammern: Fest- bzw. Wirkstoffgehalte der LP-Bildner bzw. Fließmittel in M.-%

¹⁾ Values in brackets: solids or active substance content of the air-entraining agent or plasticizer in mass %

Zusätzlich wurde an Betonen mit einem Größtkorn von 16 mm die Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton (LP-Kennwerte) in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination und dem Betonalter ermittelt. Aus den Versuchsergebnissen wurde ein Modell zur Erklärung der Luftporenbildung bei der kombinierten Zugabe von LP-Bildner und Fließmittel entwickelt. Die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Baupraxis sollen eine gezielte Luftporenbildung sicherstellen und das Risiko von Fehlanwendungen verringern.

3.2 Ausgangsstoffe

a) Zusatzmittel (LP-Bildner und Fließmittel)

Gemeinsam mit drei Zusatzmittelherstellern wurden fünf PCE und zur Anknüpfung an den bisherigen Erfahrungsbereich zwei Fließmittel auf der Basis von Melamin- bzw. Naphthalinsulfonat ausgewählt (Tafel 2). Zwei Hersteller lieferten jeweils ein PCE für den Fertigteil- und den Transportbetonbereich. Vom dritten Hersteller wurde ein PCE bereitgestellt, das in beiden Bereichen eingesetzt wird. Obwohl keine detaillierten Informationen zur Zusammensetzung

account the quantities of admixtures to be added are determined in the preliminary testing and if necessary are adjusted to suit the actual construction conditions during the construction work.

3 Test procedure

3.1 Aim and extent of the tests

An understanding of the action mechanisms occurring during the production of air-entrained concrete with plasticizers reduces the risk of incorrect applications. The extent to which interactions between air-entraining agents, plasticizers and cement can affect the air void formation was therefore examined at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry). Fine concretes (maximum grain size 4 mm) were produced with a specific air content and plasticizers were then added in several stages in order to show any possible de-foaming action in relation to the combination of starting materials. The air content and consistency of the content were determined after each partial addition. The air void formation in the fresh and hardened concrete (air void parameters) in relation to the combination of starting materials and the concrete age was also determined in concretes with a maximum grain size of 16 mm. The test results were used to develop a model to explain the air void formation during combined addition of air-entraining agents and plasticizers. The recommendations drawn from this for construction practice should ensure carefully controlled air void formation and reduce the risk of incorrect applications.

3.2 Starting materials

a) Admixtures (air-entraining agents and plasticizers)

With the help of three admixture producers five PCEs were selected as well as two plasticizers based on melamine and naphthalene sulfonates respectively to provide a link with previous experience (Table 2). Two producers each provided one PCE for the precast element sector and one for the ready-mixed concrete sector, while the third producer provided a PCE that is used in both sectors. Although no detailed information was given about the compositions of the PCEs it is true that PCEs for the ready-mixed concrete sector have a longer plasticizing action than PCEs for the precast element sector. PCEs for ready-mixed concrete consequently tend to have a lower charge density and longer side chains than PCEs for the precast element sector with their trend towards higher charge densities and shorter side chains. Air-entraining agents based on different active substances were also supplied by the producers. The FIZ also selected one air-entraining agent based on natural active substances (modified wood resin, producer 2) and one based on synthetic active substances (alkyl polyglycol ether sulfate, synthetic tenside 1, producer 3) (Table 2). Because of its good solubility the synthetic air-entraining agent 1 remains active in the pore solution while the air-entraining agents based on natural active substances are to a great extent precipitated [3].

b) Cement

Three cements of the 42,5 N strength class were selected for producing the cements: CEM I, CEM II/A-LL and CEM III/A LH/NA (Table 3).

Tafel 3: Chemische und physikalische Kennwerte der verwendeten Zemente
Table 3: Characteristic chemical and physical parameters of the cements used

Kennwert Parameter		CEM I 42,5 N	CEM II/A-LL 42,5 N	CEM III/A 42,5 N-LH/NA
K ₂ O	M.-% mass %	0,88	0,85	0,91
Na ₂ O	M.-% mass %	0,13	0,09	0,23
Na ₂ O-Äquiv. Na ₂ O equiv.	M.-% mass %	0,71	0,65	0,83
SO ₃	M.-% mass %	2,96	2,98	2,90
Hüttensandgehalt Blastfurnace slag content	M.-% mass %	–	–	50,6
Kalksteingehalt Limestone content	M.-% mass %	–	14,0	–
Erstarrungsbeginn Initial setting time	min	160	200	220
Wasseranspruch Water demand	%	27,0	29,0	30,0
Spez. Oberfläche Spec. surface area	cm ² /g	3 250	3 680	4 210
Druckfestigkeit Compr. strength				
2 d	N/mm ²	25,1	26,2	17,0
7 d		42,4	39,9	34,6
28 d		56,5	49,3	52,1

zung der PCE gegeben wurden, können folgende Angaben gemacht werden: PCE für den Transportbetonbereich wirken länger verflüssigend als PCE für den Fertigteilbereich. Dementsprechend weisen PCE für Transportbeton eher eine niedrigere Ladungsdichte und längere Seitenketten auf als PCE für den Fertigteilbereich mit tendenziell höherer Ladungsdichte und kürzeren Seitenketten. Außerdem wurden von den Herstellern LP-Bildner unterschiedlicher Wirkstoffbasis geliefert. Zusätzlich wurde vom FIZ jeweils ein LP-Bildner mit natürlicher (modifiziertes Wurzelharz, Hersteller 2) und synthetischer Wirkstoffbasis (Alkylpolyglycoethersulfat, synthetisches Tensid 1, Hersteller 3) ausgewählt (Tafel 2). Der synthetische LP-Bildner 1 verbleibt aufgrund der guten Löslichkeit aktiv in der Porenlösung, während die LP-Bildner auf natürlicher Wirkstoffbasis zum großen Teil ausfallen [3].

b) Zement

Für die Herstellung der Betone wurden drei Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 N aus unterschiedlichen Werken ausgewählt: CEM I, CEM II/A-LL und CEM III/A LH/NA (Tafel 3).

c) Gesteinskörnung

Für die Herstellung der Feinbetone (Größtkorn 4 mm) wurden Quarzmehl 0/0,1 mm, Rheinkiesand 0/2 mm und Quarzkies 2/4 mm verwendet. Für die Herstellung der Betone (Größtkorn 16 mm) wurden Quarzmehl 0/0,1 mm sowie Rheinkiesand 0/2, 2/8 und 8/16 mm mit einer Sieblinie in der Mitte des Sieblinienbereichs A/B 16 nach DIN 1045-2 eingesetzt.

d) Zugabewasser

Für die Herstellung der Betone wurde Düsseldorfer Leitungswasser verwendet.

3.3 Luftporenbildung im Feinbeton

In Untersuchungen an Feinbetonen (Größtkorn 4 mm, Zementgehalt 400 kg/m³, w/z-Wert 0,42) mit steifer Ausgangskonsistenz und einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% sollte ermittelt werden, ob nach der Fließmittel-Zugabe eine Veränderung des Luftgehalts (z.B. Abfall infolge entschäumender Wirkung des Fließmittels) auftritt. Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus 6,9 Vol.-% Quarzmehl 0/0,1 mm, 23,1 Vol.-% Rheinkiesand 0/2 mm und 70 Vol.-% Quarzkies 2/4 mm. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug 1666,5 kg/m³.

Zement und Gesteinskörnungen wurden in einem 50-l-Zwangsmischer 15 Sekunden trocken vorgemischt. Der LP-Bildner wurde unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Die Mischdauer nach Zugabe aller Bestandteile betrug zwei Minuten. Die Zugabemenge des jeweiligen LP-Bildners (Tafel 4) wurde so eingestellt, dass bei einer Mischdauer von zwei Minuten der Luftgehalt des Feinbetons geprüft mit dem 1-l-Drucktopf unmittelbar nach Mischende (5,5 ± 0,5) Vol.-% betrug. Anschließend wurde Fließmittel in mehreren Stufen von jeweils 0,2 M.-% v.z (PCE) bzw. 0,3 M.-% v.z (herkömmliche Fließmittel) zugegeben. Nach jeder Teilzugabe des Fließmittels wurde der Beton 30 Sekunden gemischt. Unmittelbar danach wurde dem Mischer Beton für die Bestimmung des LP-Gehalts (Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7) und der Konsistenz (Ausbreitmaß mit dem Hägermantisch nach DIN EN 459-2) entnommen. Die Fließmittelzugabe wurde stufenweise solange gesteigert, bis der Beton im Mischer starke Entmischungerscheinungen zeigte. Außerdem wurde in einem Zusatzversuch die Konsistenz anstatt mit Fließmittel durch Wasserzugabe eingestellt. Der w/z-Wert wurde dabei in Stufen von 0,02 erhöht.

3.4 Luftporenbildung in Frisch- und Festbeton

3.4.1 Betonzusammensetzungen

Um die Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung am Frisch- bzw. Festbeton in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination LP-Bildner/Fließmittel/Zement zu untersuchen, wurden zehn Betone (Zementgehalt 320 kg/m³, w/z-Wert 0,50, Tafel 5) hergestellt. Die Zugabemengen der Zusatzmittel wurden so festgelegt, dass die Betone 30 (PCE Fertigteil) bzw. 45 Minuten nach der Herstellung

Tafel 4: Zugabemengen LP-Bildner für einen Luftgehalt des Feinbetons von (5,5 ± 0,5) Vol.-%

Table 4: Quantities of air-entraining agent needed for an air content in the fine concrete of 5.5 ± 0.5 vol. %

Zement 42,5 N Cement 42,5 N	LP-Bildner Air-entraining agent	Zugabemenge in M.-% v.z Quantity added in mass % w.r.t. cement
CEM I	Modifiziertes Wurzelharz Modified wood resin	0,150
	Wurzelharzseife Wood resin soap	0,160
	Synthetisches Tensid 1 Synthetic tenside 1	0,055
CEM II/A-LL	Modifiziertes Wurzelharz Modified wood resin	0,200
	Synthetisches Tensid 1 Synthetic tenside 1	0,090
CEM III/A	Modifiziertes Wurzelharz Modified wood resin	0,300
	Wurzelharzseife Wood resin soap	0,320
	Synthetisches Tensid 1 Synthetic tenside 1	0,105

c) Aggregate

0/0,1 mm quartz meal, 0/2 mm coarse Rhine sand and 2/4 mm quartz gravel were used for producing the fine concretes (maximum grain size 4 mm). 0/0,1 mm quartz meal and 0/2, 2/8 and 8/16 coarse Rhine sand with a grading curve in the centre of the A/B 16 grading curve area as defined in DIN 1045-2 were used for producing the concretes (maximum grain size 16 mm).

d) Mixing water

Düsseldorf mains water was used for producing the concretes.

3.3 Air void formation in fine concrete

The investigations on fine concretes (maximum grain size 4 mm, cement content 400 kg/m³, w/c value 0.42) with a stiff initial consistency and an air content of about 5.5 vol. % were intended to determine whether a change in air content (e.g. a drop as a result of the de-foaming action of the plasticizer) occurs after addition of the plasticizer. The aggregate mix consisted of 6.9 vol. % of 0/0,1 mm quartz meal, 23.1 vol. % of 0/2 mm coarse Rhine sand and 70 vol. % of 2/4 mm quartz gravel. The aggregate content was 1666.5 kg/m³.

The cement and aggregate were mixed dry for 15 seconds in a 50 l mechanical mixer. The air-entraining agent was added to the mixing water immediately before the concrete was mixed. The mixing time after addition of all constituents was two minutes. The amount of each air-entraining agent added (Table 4) was set so that with a mixing time of two minutes the air content of the fine concrete was 5.5 ± 0.5 vol. % when tested with a 1 l pressure vessel immediately after the end of mixing. Plasticizer was then added in several stages, each of 0.2 mass % w.r.t. cement (PCE) or 0.3 mass % w.r.t. cement (conventional plasticizer). The concrete was mixed for 30 seconds after each partial addition of plasticizer. Immediately after that some concrete was taken from the mixer to determine the air-void content (pressure equalization method as specified in DIN EN 12350-7) and the consistency (flow table spread on the Hägermann table as specified in DIN EN 459-2). The addition of plasticizer was continued in stages until the concrete exhibited strong signs of segregation in the mixer. In an additional test the consistency was also adjusted by the addition of water instead of with plasticizer. The w/c ratio was increased in stages of 0.02.

Tafel 5: Zement/Zusatzmittelkombinationen (Zementgehalt 320 kg/m³, w/z-Wert 0,50)

Table 5: Cement/admixture combinations (cement content 320 kg/m³, w/c ratio 0.50)

Nr No.	Zement Cement 42,5 N	Fließmittel Plasticizer			LP-Bildner Air-entraining agent			Wirkstoff- verhältnis FM/LP Active substance ratio plasticizer/ air-entraining agent
		Typ Type	Zugabemenge M.-% v.z Quantity added mass % w.r.t. cement		Typ Type	Zugabemenge M.-% v.z Quantity added mass % w.r.t. cement		
			FM Plasticizer	Wirkstoff Active substance		LP Air-entraining agent	Wirkstoff Active substance	
1	CEM I	PCE Fertigteil 30 Minuten ¹⁾ PCE precast element 30 minutes ¹⁾	0,29	0,084	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	0,075	0,0146	6
2			0,25	0,073	Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	0,020	0,0016	46
3		PCE Transportbeton 45 Minuten ¹⁾ PCE ready-mixed concrete 45 minutes ¹⁾	0,50	0,100	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	0,085	0,0165	6
4			0,50	0,100	Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	0,020	0,0016	63
5	CEM III/A	PCE Fertigteil 30 Minuten ¹⁾ PCE precast element 30 minutes ¹⁾	0,30	0,087	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	0,165	0,0320	3
6			0,29	0,084	Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	0,040	0,0032	26
7		PCE Transportbeton 45 Minuten ¹⁾ PCE ready-mixed concrete 45 minutes ¹⁾	0,55	0,110	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	0,180	0,0350	3
8			0,50	0,100	Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	0,040	0,0032	31
9		Naphthalinsulfonat 45 Minuten ¹⁾ Naphthalene sulfonate 45 minutes ¹⁾	0,80	0,320	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	0,200	0,0388	8
10			0,80	0,320	Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	0,080	0,0155	21

¹⁾ Zeitraum von 30 bzw. 45 Minuten nach Mischende: Luftgehalt (5,5 ± 0,5) Vol.-% und Ausbreitmaß 49 cm bis 55 cm (F4)

¹⁾ Period from 30 or 45 minutes after end of mixing: air content 5.5 ± 0.5 vol. % and flow table spread 49 cm to 55 cm (F4)

(PCE Transportbeton bzw. herkömmliches Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis) einen Luftgehalt von (5,5 ± 0,5) Vol.-% bzw. ein Ausbreitmaß von 49 cm bis 55 cm (Konsistenzklasse F4) aufwiesen. Die Betone wurden mit CEM I- und CEM III/A-Zement in Kombination mit folgenden Zusatzmitteln (FM bzw. LP) hergestellt:

- LP-Bildner: modifiziertes Wurzelharz (Hersteller 2), synthetisches Tensid 1 (Hersteller 3)
- Fließmittel: PCE Fertigteil und PCE Transportbeton (Hersteller 2) und Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (Hersteller 1, nur in Kombination mit CEM III-Zement).

3.4.2 Herstellung, Lagerung und Prüfung

Zement und Gesteinskörnungen wurden in einem Zwangsmischer 15 Sekunden trocken vorgemischt. Das Mischungsvolumen betrug gleich bleibend rd. 180 Liter. Der LP-Bildner wurde unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Nach der Wasserzugabe wurde zwei Minuten gemischt. Anschließend wurde der Mischer angehalten und Beton für die vorgesehenen Frisch- und Festbetonprüfungen entnommen. Danach wurde das Fließmittel zugegeben und nochmals eine Minute gemischt. Der Zeitpunkt nach dem einminütigen Einmischen des Fließmittels wurde als „Mischende“ definiert. Nach dem Einmischen des Fließmittels und 10, 20, 30, 45 und 60 Minuten nach Mischende wurde Beton für die vorgesehenen Untersuchungen entnommen. Bei Entmischungerscheinungen wurde vor der Frischbetonentnahme nochmals über einen Zeitraum von zehn Sekunden gemischt.

Die Probekörper für die Festbetonprüfungen wurden in Stahlformen auf dem Rütteltisch verdichtet. Um den zeitlichen Verlauf der LP-Kennwerte zu bestimmen, wurden von jedem der zehn Betone sechs Würfel (150 mm Kantenlänge) zu folgenden Zeitpunkten hergestellt:

- nach dem Einmischen des LP-Bildners (zwei Minuten Mischdauer),

3.4 Air void formation in fresh and hardened concrete

3.4.1 Concrete compositions

Ten concretes (cement content 320 kg/m³, w/c ratio 0.50, Table 5) were produced in order to investigate the action mechanisms of air void formation in fresh and hardened concrete in relation to the combination of the air-entraining agent/plasticizer/cement starting materials. The quantities of admixtures added were laid down so that the concrete had an air content of 5.5 ± 0.5 vol. % and a flow table spread of 49 cm to 55 cm (consistency class F4) 30 minutes after production (precast element PCE) or 45 minutes after production (ready-mixed concrete PCE or conventional plasticizer based in naphthalene sulfonate). The concretes were produced with CEM I and CEM III/A cements in combination with the following admixtures (plasticizers and air-entraining agents):

- air-entraining agent: modified wood resin (producer 2), synthetic tenside 1 (producer 3)
- plasticizer: precast element PCE and ready-mixed concrete PCE (producer 2) as well as plasticizer based on naphthalene sulfonate (producer 1, only in combination with CEM III cement).

3.4.2 Production, storage and testing

The cement and aggregate were mixed dry for 15 seconds in a compulsory mixer. The mix volume was kept constant at about 180 litres. The air-entraining agent was added to the mixing water immediately before the concrete was mixed. Mixing was carried out for two minutes after the addition of water. The mixer was then stopped and concrete was removed for the planned fresh and hardened concrete tests. The plasticizer was then added and the concrete was mixed for a further minute. The moment after the one-minute mixing of the plasticizer was defined as the “end of mixing”. Concrete for the planned investigations was taken after mixing in the plasticizer and 10, 20, 30, 45 and 60 minutes after the

- nach dem Einmischen des Fließmittels (eine Minute Mischdauer) entsprechend Mischende sowie
- 10, 30, 45 und 60 Minuten nach Mischende.

Zu den genannten Zeitpunkten wurden das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 und der Luftgehalt im Drucktopf nach DIN EN 12350-7 bestimmt. Der LP-Topf wurde auf dem Rütteltisch verdichtet. Zusätzlich wurden je nach verwendetem Fließmittel 30 Minuten (PCE Fertigteil) bzw. 45 Minuten (PCE Transportbeton bzw. Naphthalinsulfonat) nach Mischende drei Würfel (150 mm Kantenlänge) zur Bestimmung der 28-Tage-Druckfestigkeit hergestellt.

Nach der Herstellung wurden die Probekörper (24 ± 1) Stunden im Klimaraum bei einer Lufttemperatur von $(20,0 \pm 2,0)^\circ\text{C}$ und einer rel. Luftfeuchtigkeit von $(65 \pm 5) \%$ in ihren Formen abgedeckt mit feuchten Tüchern gelagert. Anschließend wurden die Probekörper ausgeschalt. Die Probekörper wurden danach wie folgt gelagert und geprüft:

a) Druckfestigkeit

Drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge wurden nach dem Ausschalen nach DIN EN 12390-2 entsprechend dem Nationalen Anhang gelagert. Die Druckfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-3 geprüft.

b) Luftporenkennwerte

Die für die Bestimmung der LP-Kennwerte vorgesehenen Würfel wurden nach dem Ausschalen bis zum Alter von sieben Tagen unter Wasser und anschließend im Klimaraum bis zu dem Zeitpunkt gelagert, an dem aus dem Würfel zwei Scheiben für die Bestimmung der LP-Kennwerte in Anlehnung an DIN EN 480-11 entnommen wurden.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Luftporenbildung im Feinbeton

4.1.1 Erforderliche LP-Bildner-Zugabemenge

Die Zugabemengen an LP-Bildner zur Erreichung des geforderten Luftgehalts im Feinbeton ($(5,5 \pm 0,5) \%$ Vol.-%, Mischdauer zwei Minuten) sind in Tafel 4 zusammengestellt. Vorversuche mit verlängerter Mischdauer hatten gezeigt, dass weiteres Mischen den Luftgehalt nicht erhöhte und dass der LP-Bildner vollständig aktiviert war. Die beiden Wurzelharze erforderten vergleichbare Zugabemengen. Bei dem synthetischen Tensid 1 wurden im Vergleich zu den natürlichen LP-Bildnern wesentlich geringere Zugabemengen benötigt. Unabhängig von der Wirkstoffart des LP-Bildners waren beim CEM II- und CEM III-Zement höhere Dosierungen erforderlich als beim CEM I-Zement. Ursache ist vermutlich die größere Oberfläche des CEM II- bzw. CEM III-Zements, die zu einer verstärkten Sorption des LP-Bildners führt. Die Mahlfineiten betrugen $3\,250/3\,680/4\,210 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine (CEM I-/CEM II/B-S-/CEM III/A-Zement, Tafel 3).

4.1.2 Einfluss des Fließmittels auf die Luftporenbildung

Der Einfluss des Fließmittels auf die Luftporenbildung ist beispielhaft in den Bildern 2a bis 2d für Kombinationen der drei Fließmittel des Herstellers 2 mit dem CEM I- und CEM III-Zement und zwei LP-Bildnern (mod. Wurzelharz, synthetisches Tensid 1) dargestellt. Mit den drei Fließmitteln des Herstellers 1 und dem PCE des Herstellers 3 wurden vergleichbare Ergebnisse erzielt. Die Zugabemenge an Fließmittel wurde in Teilschritten von 0,20 M.-% (PCE) bzw. 0,30 M.-% (Melamin- bzw. Naphthalinsulfonat) v.z. (Mischdauer jeweils 30 Sekunden) erhöht. Nach jeder Teilzugabe wurden der Luftgehalt und das Ausbreitmaß (Hägermannisch) bestimmt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Fließmittel wurden in den Bildern 2a bis 2d Luftgehalt und Ausbreitmaß in Abhängigkeit vom aufsummierten Fließmittelwirkstoff angegeben.

Nach der ersten und zweiten Fließmittel-Teilzugabe war bei dem LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis ein geringer Luftgehaltsabfall oder ein gleich bleibender Luftgehalt zu verzeichnen (Bild 2a und 2c). Nach der dritten Fließmittel-Teilzugabe stieg der Luftgehalt insgesamt an. Beim synthetischen LP-Bildner 1 stieg

end of mixing. If there were signs of segregation the concrete was mixed again for 10 seconds before removing the fresh concrete.

The test pieces for the hardened concrete tests were compacted in steel moulds on a vibrating table. In order to determine the behaviour of the air-void parameters with time six cubes (edge length 150 mm) were produced from each of the ten concretes at the following times:

- after mixing in the air-entraining agent (two minutes mixing time),
- after mixing in the plasticizer (one minute mixing time) corresponding to the end of mixing, and
- 10, 30, 45 and 60 minutes after the end of mixing.

At these times the flow table spread was determined as specified in DIN EN 12350-5 and the air content was determined in the pressure vessel as specified in EN 12350-7. The air void vessel was compacted on the vibrating table. Three cubes (edge length 150 mm) were also produced either 30 minutes (precast element PCE) or 45 minutes (ready-mixed concrete PCE or naphthalene sulfonate) after the end of mixing (depending on the plasticizer used) to determine the 28 day compressive strengths.

After production the test pieces were stored for 24 ± 1 hours in a climatic chamber at an air temperature of $20.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $65 \pm 5 \%$ in their moulds covered with moist cloth. The test pieces were then removed from the moulds and stored and tested as follows:

a) Compressive strength

After they had been removed from their moulds three cubes with edge lengths of 150 mm were stored as specified in DIN EN 12390-2 in accordance with the national appendix. The compressive strengths were tested at 28 days as specified in DIN EN 12390-3.

b) Air void parameters

After they had been removed from their moulds the cubes intended for determination of the air void parameters were stored under water until they were seven days old and then stored in a climatic chamber until the moment when two slices were taken from each cube for determining the air void parameters as described in DIN EN 480-11.

4 Test results

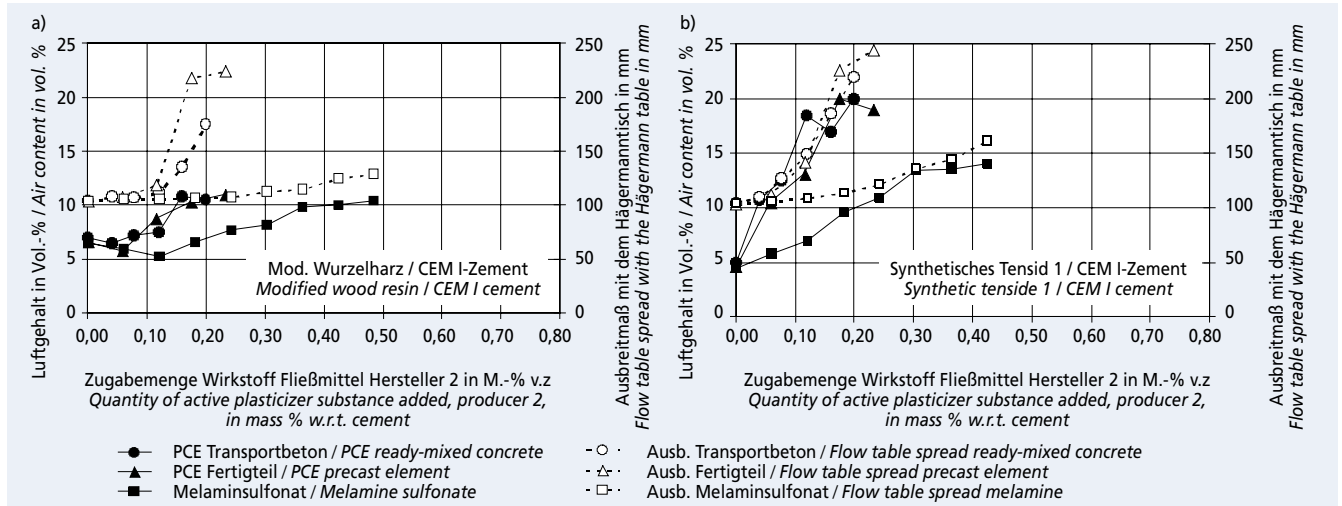
4.1 Air void formation in fine concrete

4.1.1 Required addition levels of air-entraining agent

The quantities of air-entraining agent needed to achieve the required air content in fine concrete ($5.5 \pm 0.5 \text{ vol. } \%$, mixing time two minutes) are listed in Table 4. Preliminary tests with extended mixing times had shown that further mixing did not increase the air content and that the air-entraining agents were fully activated. The two wood resins required comparable addition levels. Substantially smaller addition levels were required for synthetic tenside 1 when compared with the natural air-entraining agents. Regardless of the type of active substance in the air-entraining agent higher addition levels were required for the CEM II and CEM III cements than for the CEM I cement. This is presumably due to the larger surface areas of the CEM II and CEM III cements, which lead to increased sorption of the air-entraining agents. The finenesses were $3\,250/3\,680/4\,210 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine (CEM I/CEM II/B-S/CEM III/A cement, Table 3).

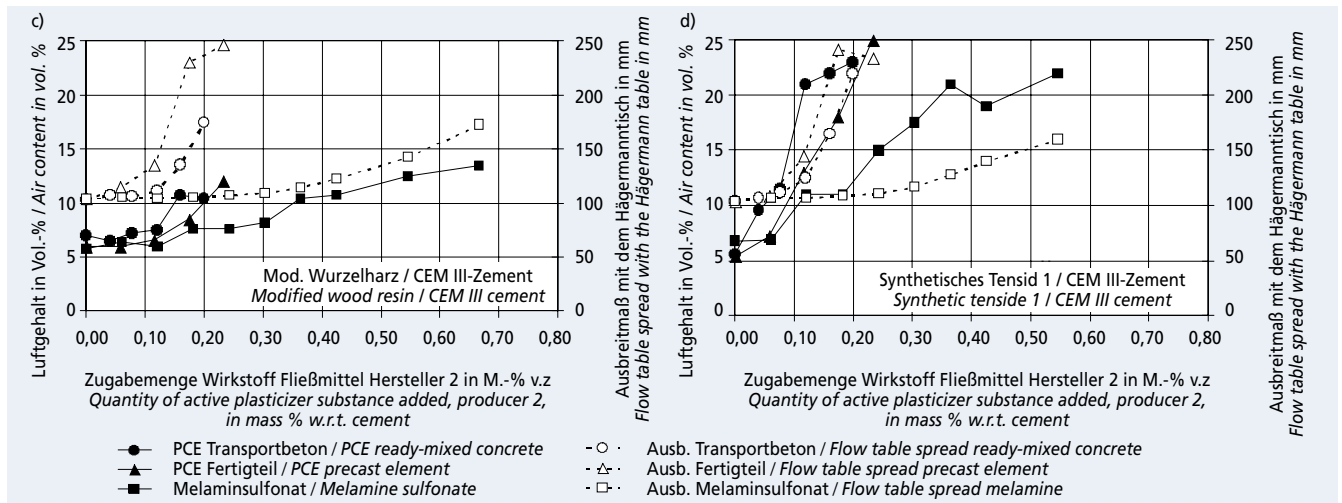
4.1.2 Influence of the plasticizer on air void formation

Examples of the influence of the plasticizer on air void formation are shown in Figs. 2a to 2d for combinations of the three plasticizers from producer 2 with the CEM I and CEM III cements and two air entraining agents (modified wood resin, synthetic tenside 1). Comparable results were obtained with the three plasticizers from producer 1 and the PCE from producer 3. The quantity of plasticizer added was increased in small stages of 0.20 mass % (PCE) or 0.30 mass % (melamine and naphthalene sulfonate) w.r.t. cement (mixing time of 30 seconds in each case). The air content and the flow table spread (Hägermann table) were determined after each partial addition. The air content and flow table spread are



Bilder 2a und b: Luftporenbildung und Konsistenz in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 bei Verwendung des CEM I-Zements: links LP-Bildner auf Wurzelharzbasis und rechts synthetisches Tensid 1

Figures 2a and b: Air void formation and consistency relative to the type and addition level of the plasticizer from producer 2 when using CEM I cement: left – air-entraining agent based on wood resin, and right – synthetic tenside 1



Bilder 2c und d: Luftporenbildung und Konsistenz in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 bei Verwendung des CEM III-Zements: links LP-Bildner auf Wurzelharzbasis und rechts synthetisches Tensid 1

Figures 2c and d: Air void formation and consistency relative to the type and addition level of the plasticizer from producer 2 when using CEM III cement: left – air-entraining agent based on wood resin, and right – synthetic tenside 1

der Luftgehalt immer bereits nach der ersten Teilzugabe an (Bild 2b und 2d). Der Anstieg fiel wesentlich stärker aus als beim natürlichen LP-Bildner. Bei Verwendung der Fließmittel auf PCE-Basis war der Anstieg des Luftgehalts stärker ausgeprägt als bei den herkömmlichen Fließmitteln (z.B. Melaminsulfonat). Zwischen den PCE (Transportbeton und Fertigteil) bzw. zwischen CEM I- und CEM II-Zement war kein nennenswerter Unterschied festzustellen. Beim CEM III-Zement war der Anstieg etwas stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement. Ein wesentlicher Abfall des Luftgehalts durch eine entschäumende Wirkung des Fließmittels konnte nicht festgestellt werden.

Kombinationen mit dem synthetischen LP-Bildner und einem Fließmittel auf PCE-Basis wiesen eine größere Schwankungsbreite im Luftgehalt auf als Kombinationen mit natürlichem LP-Bildner und herkömmlichem Fließmittel. Wenn die weichere Konsistenz nicht mit einem Fließmittel, sondern durch erhöhte Wasserzugabe eingestellt wurde, stieg der Luftgehalt nach jeder Teil-Wasserzugabe an (Bild 3). Beim CEM III-Zement fiel der Anstieg etwas stärker aus. Bei der KonsistenzEinstellung mit Fließmittel wurden in Abhängigkeit von der Wirkstoffart des LP-Bildners

shown in Figs. 2a and 2d in relation to the total active substance in the plasticizer for better comparability of the plasticizers.

After the first and second partial additions of plasticizer a slight drop in air content or a constant air content were recorded with the air-entraining agent based on natural active substance (Figs. 2a and 2c). After the third partial addition of plasticizer there was a universal increase in air content. With synthetic air-entraining agent 1 the air content always increased even after the first partial addition (Figs. 2b and 2d). The rise was substantially greater than with the natural air-entraining agent. The rise in air content was more strongly marked when using the PCE-based plasticizers than with the conventional plasticizers (e.g. melamine sulfonate). No appreciable differences were found between the PCEs (ready-mixed concrete and precast elements) or between CEM I and CEM II cements. With CEM III cement the rise was somewhat more strongly marked than with CEM I cement. No substantial drop in air content due to de-foaming action of the plasticizers was detected.

Combinations with the synthetic air-entraining agent and a PCE-based plasticizer exhibited a greater range of fluctuation in

große Unterschiede in der Luftporenbildung (synthetisches Tensid: großer Anstieg, natürlicher LP-Bildner: geringer Anstieg) festgestellt. Diese Unterschiede traten bei der KonsistenzEinstellung mit Wasserzugabe bzw. Veränderung des w/z-Werts nicht auf.

4.2 Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton

4.2.1 Zugabemenge Zusatzmittel in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

Die Zusatzmittel-Zugabemengen zur Erzielung des angestrebten Luftgehalts von $(5,5 \pm 0,5)$ Vol.-% bzw. des Ausbreitmaßes von 49 cm bis 55 cm sind in Bild 4 links (LP-Bildner) bzw. Bild 4 rechts (Fließmittel) und in Tafel 5 zusammengestellt. Beim CEM III-Zement musste bei beiden LP-Bildnern die Zugabemenge im Vergleich zum CEM I-Zement erhöht werden. Die Art des PCE beeinflusste die LP-Bildner-Dosierung nur geringfügig, dies galt für beide Zementarten. Beton mit Naphthalinsulfonat erforderte die höchste LP-Bildner-Dosierung. Unabhängig von der gewählten Zement/Fließmittel-Kombination waren beim natürlichen LP-Bildner im Vergleich zum synthetischen Tensid 10-fach höhere Wirkstoffkonzentrationen erforderlich, um den angestrebten Luftgehalt zu erreichen (Tafel 5).

Die erforderliche Fließmittel-Zugabemenge zur Einstellung der gewünschten Konsistenz wurde durch die Wirkstoffbasis des LP-Bildners und die Zementart nicht nennenswert beeinflusst (Bild 4 rechts). Je nach Fließmittel wurde eine vergleichsweise geringe (PCE Fertigteil), mittlere (PCE Transportbeton) bzw. hohe (Naphthalinsulfonat) Zugabemenge benötigt. Diese Reihenfolge blieb auch unter Berücksichtigung der Wirkstoffgehalte der Fließmittel erhalten. Im Vergleich zu den LP-Bildnern wurden die Fließmittel in wesentlich höheren Wirkstoff-Zugabemengen eingesetzt. Das Wirkstoffverhältnis FM/LP schwankte zwischen 3 und 8 (natürlicher LP-Bildner) bzw. 21 und 63 (synthetischer LP-Bildner).

4.2.2 Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

4.2.2.1 Konsistenz

Nach Einmischen des LP-Bildners betrug das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons rd. 35 cm (Bilder 5a bis 5e). Nach Fließmittelzugabe erhöhte sich das Ausbreitmaß auf mehr als 60 cm. Danach stand der Frischbeton bis zum nächsten Prüfzeitpunkt (10 Minuten nach Mischende) abgedeckt im Mischer. Bei vereinzelt auftretenden Entmischungerscheinungen wurde der Beton unmittelbar vor dem vorgesehenen Prüfzeitpunkt über einen Zeitraum von 10 Sekunden gemischt. Mit zunehmendem Betonalter verringerten sich die Entmischungerscheinungen infolge des Ansteifens des Betons. Das PCE für den Transportbetonbereich und das Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis wirkten länger verflüssi-

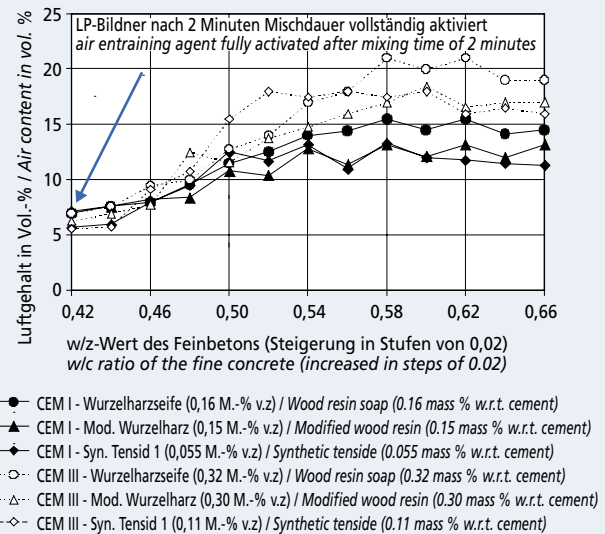


Bild 3: Luftgehalt des Feinbetons in Vol.-% in Abhängigkeit von der zusätzlichen Wasserzugabe, dem Zement und dem LP-Bildner (Ausbreitmaße w/z = 0,50 rd. 130 mm, w/z = 0,58 rd. 180 mm und w/z = 0,66 rd. 210 mm)

Figure 3: Air content of the fine concrete in vol. % relative to the extra water addition, the cement and the air-entraining agent (flow table spread w/c = 0.50 about 130 mm, w/c = 0.58 about 180 mm and w/c = 0.66 about 210 mm)

air content than combinations with natural air-entraining agents and conventional plasticizers. When the softer consistency was obtained by increased addition of water rather than with a plasticizer then the air content increased after each partial addition of water (Fig. 3). The rise was somewhat sharper with CEM III cement. When the consistency was adjusted with plasticizer great differences in air void formation were established that depended on the type of active substance in the plasticizer (synthetic tenside: large rise, natural air-entraining agent: small rise). These differences did not occur when the consistency was adjusted by the addition of water or by changing the w/c ratio.

4.2 Air void formation in fresh and hardened concrete

4.2.1 Quantity of admixture added in relation to the combination of starting materials

The quantities of admixture added to achieve the required air content of 5.5 ± 5 vol. % or a flow table spread of 49 cm to 55 cm are

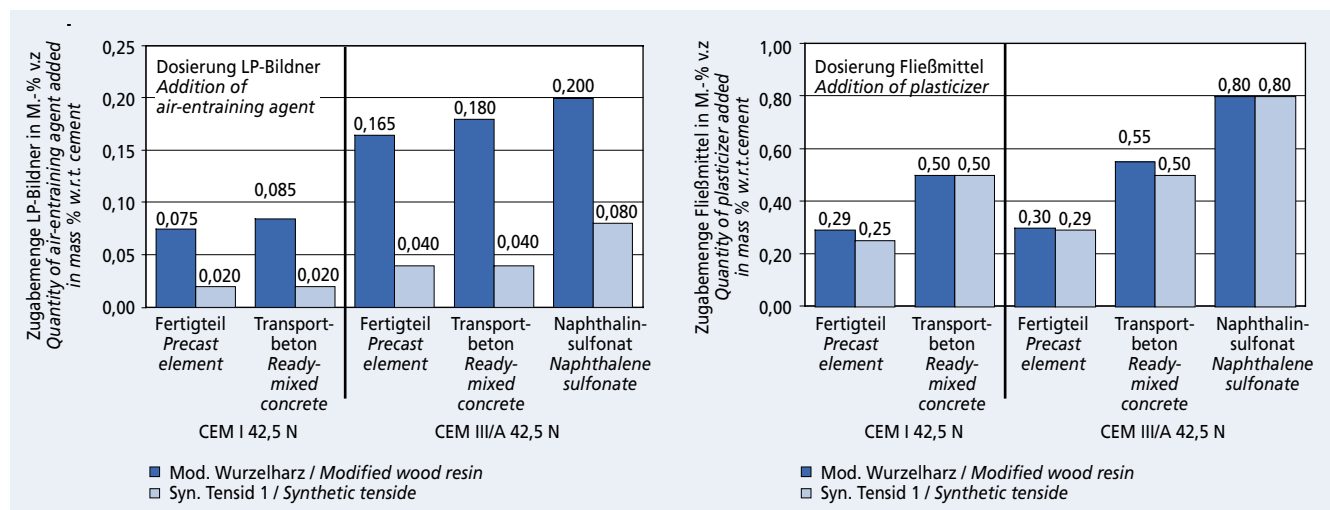
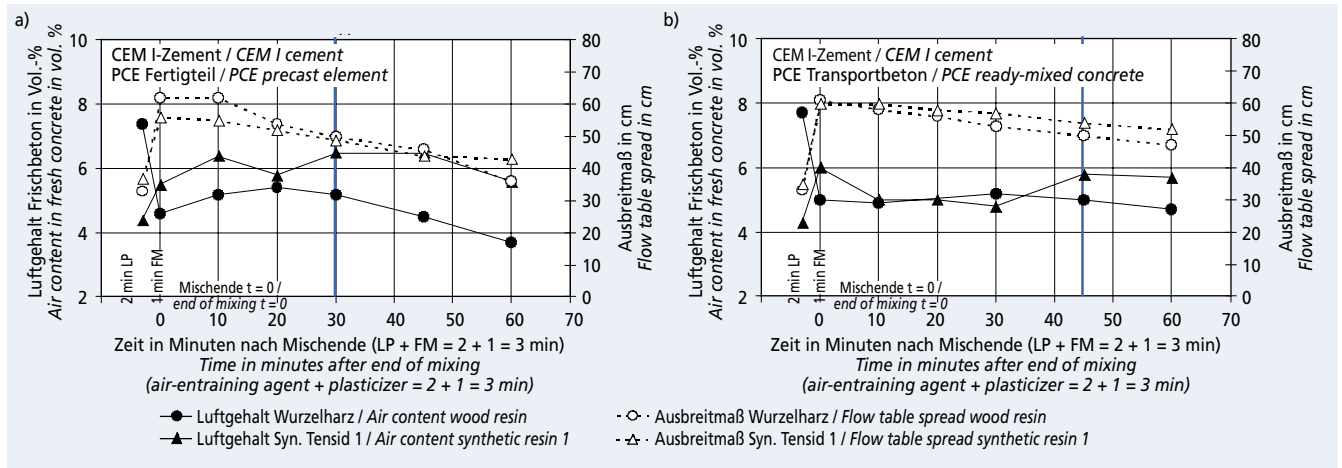


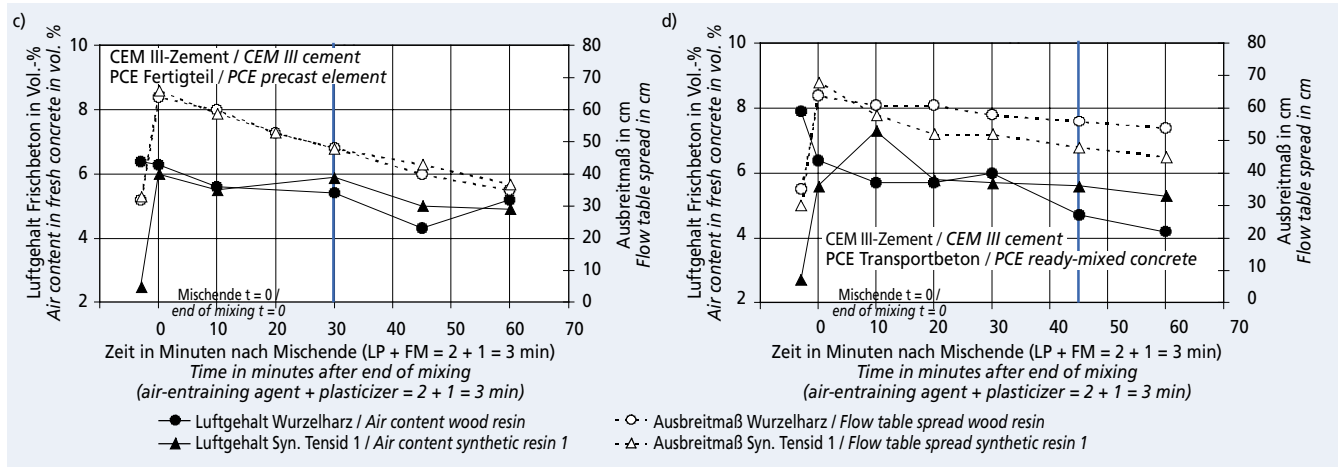
Bild 4: Zugabemengen Zusatzmittel: LP-Bildner (links) bzw. Fließmittel (rechts)

Figure 4: Quantities of admixture added: air-entraining agent (left) and plasticizer (right)



Bilder 5a und b: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften bei Verwendung des CEM I-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)

Figures 5a and b: Behaviour with time of the fresh concrete properties when using CEM I cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)



Bilder 5c und d: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften bei Verwendung des CEM III-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)

Figures 5c and d: Behaviour with time of the fresh concrete properties when using CEM III cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)

gend als das PCE für den Fertigteilbereich. Das Absinken des Ausbreitmaßes war beim PCE Fertigteil stärker ausgeprägt. Größere Zement- bzw. LP-Bildner-abhängige Unterschiede wurden nicht festgestellt.

4.2.2.2 Luftgehalt

a) Fließmittel auf PCE-Basis (Bilder 5a bis 5d)

Die zeitabhängige Luftporenbildung der Betone mit den beiden PCE-Varianten war vergleichbar. Nach dem Einmischen des LP-Bildners lagen die Luftgehalte der Betone mit natürlichem LP-Bildner mit rd. 7 Vol.-% bis 8 Vol.-% oberhalb und die Luftgehalte der Betone mit synthetischem Tensid mit rd. 2,5 Vol.-% bis 4,5 Vol.-% unterhalb des Zielwerts von 5,5 Vol.-%. Nach dem Einmischen des PCEs (Mischende) fiel der Luftgehalt bei den Betonen mit natürlichem LP-Bildner ab bzw. stieg bei den Betonen mit synthetischem LP-Bildner an. Beim natürlichen LP-Bildner fiel der Luftgehaltsabfall beim CEM III-Zement geringer aus als beim CEM I-Zement. Der Anstieg beim synthetischen Tensid war beim CEM III-Zement stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement. Bis zum Prüfalter von 30 Minuten bzw. 45 Minuten nach Mischende war keine eindeutige Tendenz zu erkennen, der Luftgehalt blieb annähernd konstant. Danach fiel der Luftgehalt bis zum Prüfalter von 60 Minuten ab.

listed in Fig. 4 left (air-entraining agents) and Fig. 4 right (plasticizers) and in Table 5. With CEM III cement the quantities added had to be increased for both air-entraining agents when compared with CEM I cement. The type of PCE had only a slight effect on the addition level of the air-entraining agent, and this applied to both types of cement. Concrete made with naphthalene sulfonate required the highest addition level of air-entraining agent. Ten-times higher concentrations of active substance were required with the natural air-entraining agent than with the synthetic tenside to achieve the required air content (Table 5), regardless of the chosen cement/plasticizer combination.

The amount of plasticizer required to obtain the desired consistency was not appreciably affected by the basis of the active substance in the air-entraining agent or by the type of cement (Fig. 4, right). A comparatively low (precast element PCE), moderate (ready-mixed concrete PCE) or high (naphthalene sulfonate) addition level was required, depending on the plasticizer. This sequence was also retained when the levels of active substance in the plasticizers were taken into account. The plasticizers were used with substantially higher addition levels of the active substance than for the air-entraining agents. The plasticizer/air-entraining agent ratio of active substances ranged between 3 and 8 (natural air-entraining agents) and between 21 and 63 (synthetic air-entraining agents).

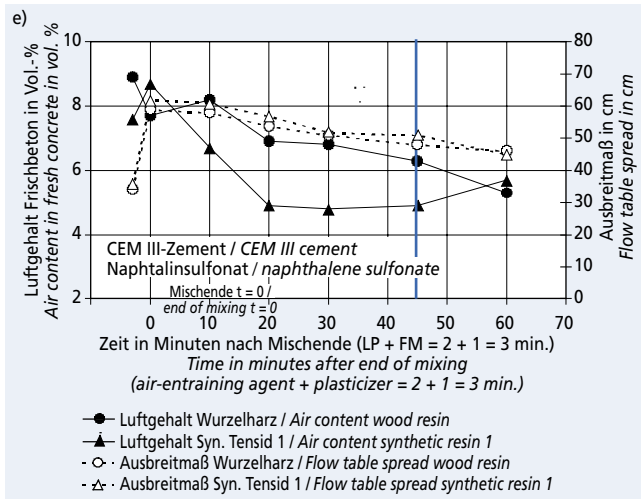


Bild 5e: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit vom LP-Bildner: Variante Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-basis (Hersteller 1) und CEM III-Zement

Figure 5e: Behaviour with time of the fresh concrete properties relative to the air-entraining agent: plasticizer variant based on naphthalene sulfonate (producer 1) and CEM III cement

b) Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (Bild 5e)

Die Betone mit Naphthalinsulfonat wiesen eine annähernd vergleichbare Luftporenbildung auf, ein deutlicher Einfluss der Wirkstoffart des LP-Bildners gegenüber den PCE-Varianten wurde nicht festgestellt. Nach dem Einmischen des LP-Bildners lag der Luftgehalt mit rd. 8 Vol.-% bis 9 Vol.-% weit über dem Zielwert von 5,5 Vol.-%. Nach der Fließmittelzugabe (Mischende) betrug der Luftgehalt noch rd. 8 Vol.-% und verringerte sich mit zunehmendem Frischbetonalter.

4.2.3 Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

4.2.3.1 Luftporenkennwerte

a) Fließmittel auf PCE-Basis (Bilder 6a bis 6d)

Nach der Zugabe des LP-Bildners wurden bei den Betonen mit natürlichem LP-Bildner entsprechend dem höheren Luftgehalt von rd. 7 Vol.-% bis 8 Vol.-% geringere Abstandsfaktoren und höhere Mikro-Luftporengehalte festgestellt als bei den Betonen mit synthetischem LP-Bildner, die auch geringere Luftgehalte (rd. 2,5 Vol.-% bis 4,5 Vol.-%) aufwiesen. Die Zugabe des Fließ-

4.2.2 Fresh concrete properties in relation to the combination of starting materials

4.2.2.1 Consistency

The flow table spread of the initial concrete after the air-entraining agent had been mixed in was about 35 cm (Figs. 5a to 5e). After addition of the plasticizer the flow table spread increased to more than 60 cm. The fresh concrete was then kept covered in the mixer until the next test time (10 minutes after end of mixing). When signs of segregation occurred occasionally the concrete was mixed for 10 seconds immediately before the planned test time. The signs of segregation decreased with increasing concrete age due to the stiffening of the concrete. The PCE for the ready-mixed concrete sector and the plasticizer based on naphthalene sulfonate had a longer plasticizing action than the PCE for the precast element sector. The drop in flow table spread was more strongly marked with the precast element PCE. No major differences due to the cement or the air-entraining agent were detected.

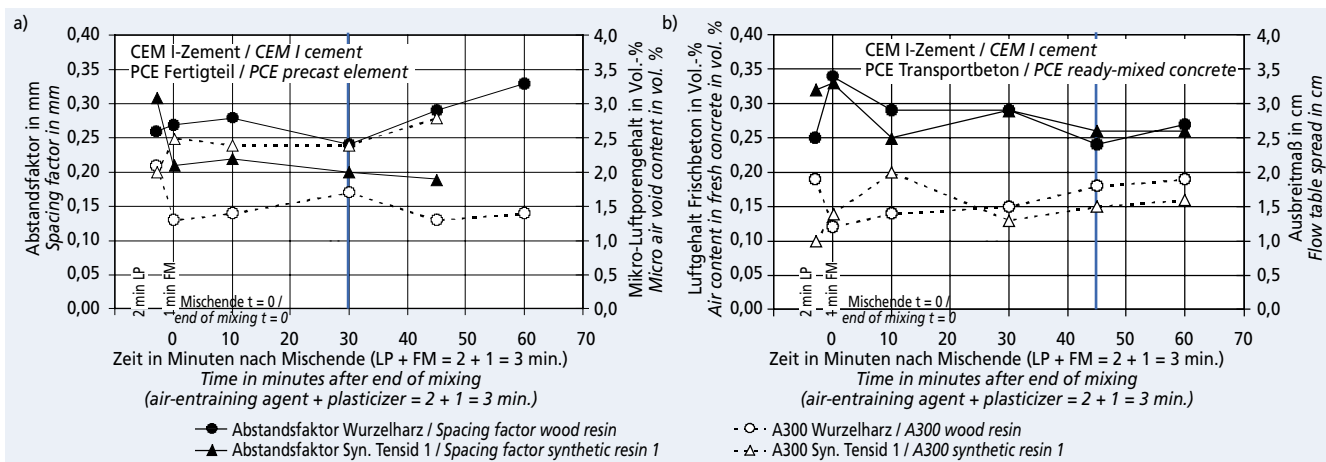
4.2.2.2 Air content

a) PCE-based plasticizer (Figs. 5a to 5d)

The concretes made with the two PCE variants exhibited comparable time-dependent air void formation. The air contents of the concretes made with natural air-entraining agent had been mixed in were above the target value of 5.5 vol. % and the air contents of the concretes made with synthetic tenside of about 2.5 vol. % to 4.5 vol. % were below it. After the PCE had been mixed in (end of mixing) the air contents of the concretes made with natural air-entraining agents fell and those of the concretes made with synthetic air-entraining agent rose. With the natural air-entraining agent the drop in air content was less with CEM III cement than with CEM I cement. The rise with the synthetic tenside was more strongly marked with the CEM III cement than with the CEM I cement. No clear trend could be identified up to the test ages of 30 minutes and 45 minutes respectively after the end of mixing – the air content remained virtually constant. After that the air content fell until a test age of 60 minutes.

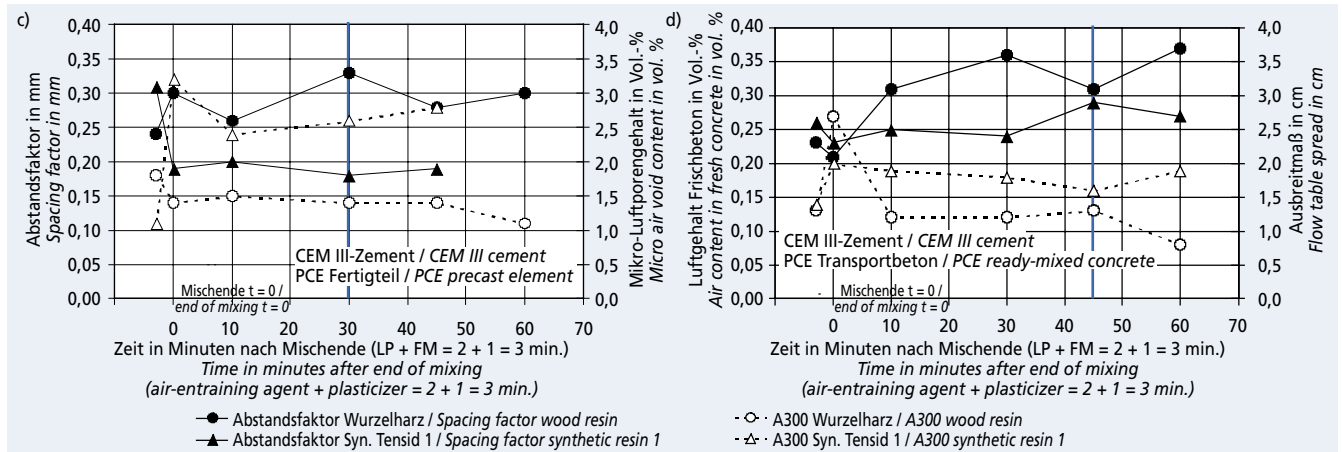
b) Plasticizer based on naphthalene sulfonate (Fig. 5e)

The concretes made with naphthalene sulfonate exhibited approximately comparable air void formation. The type of active substance in the air-entraining agents had no detectable significant influence such as was found with the PCE variants. The air content of about 8 vol. % to 9 vol. % after the air-entraining agent had been mixed in was far above the target value of 5.5 vol. %. After addition of the plasticizer (end of mixing) the air content was still about 8 vol. % and fell with increasing age of the fresh concrete.



Bilder 6a und b: Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte bei Verwendung des CEM I-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)

Figures 6a and b: Behaviour with time of the air void parameters when using CEM I cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)



Bilder 6c und d: Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte bei Verwendung des CEM III-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)

Figures 6c and d: Behaviour with time of the air void parameters when using CEM III cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)

mittels bewirkte bei den Betonen mit natürlichem LP-Bildner einen Abfall des Luftgehalts verbunden mit einer Verschlechterung der LP-Kennwerte (Bilder 5a bis 5d) und bei den Betonen mit synthetischem Tensid einen Anstieg des Luftgehalts verbunden mit einer Verbesserung der LP-Kennwerte. Im Zeitraum zwischen Mischende (nach Zugabe des Fließmittels) und 60 Minuten nach Mischende war keine eindeutige Tendenz erkennbar.

b) Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (Bild 6e)

Mit zunehmendem Betonalter wurden größere Abstands faktoren und geringere Mikro-Luftporengehalte bestimmt. Der bei den PCEs aufgetretene LP-Bildner-Einfluss wurde nicht festgestellt. Der Luftgehalt insgesamt fiel ebenfalls ab (Bild 5e). Mit zunehmendem Frischbetonalter entweichen daher immer mehr kleine (Verschlechterung der LP-Kennwerte) und große Luftporen (Verringerung des Gesamtluftgehalts) aus dem Frischbeton.

c) Vergleich der LP-Kennwerte mit den Anforderungen

30 Minuten bzw. 45 Minuten nach Mischende wiesen die Betone die gewünschten Konsistenzen bzw. Luftgehalte auf. Die zu diesen

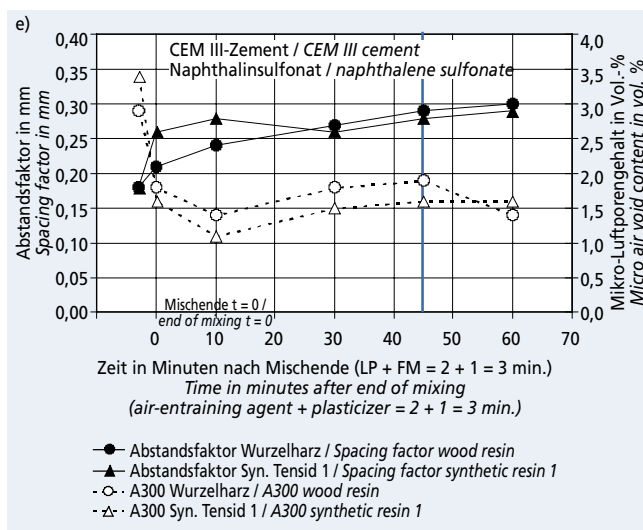


Bild 6e: Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis (Hersteller 1) und CEM III-Zement

Figure 6e: Behaviour with time of the air void parameters relative to the air-entraining agent: plasticizer variant based on naphthalene sulfonate (producer 1) and CEM III cement

4.2.3 Hardened concrete properties in relation to the combination of starting materials

4.2.3.1 Air void parameters

a) PCE-based plasticizers (Figs. 6a to 6d)

After the addition of the air-entraining agent the concretes made with natural air-entraining agent exhibited lower spacing factors, corresponding to their higher air contents of about 7 vol. % to 8 vol. %, and higher micro air void contents than the concretes made with synthetic air-entraining agents that also exhibited lower air contents (about 2.5 vol. % to 4.5 vol. %). In the concretes made with natural air-entraining agents the addition of the plasticizer caused a drop in air content combined with a deterioration in the air void parameters (Figs. 5a to 5d) and in the concretes made with synthetic tenside it caused an increase in air content combined with an improvement in the air void parameters. No clear trend could be detected in the period between the end of mixing (after addition of the plasticizer) and 60 minutes after the end of mixing.

b) Plasticizer based on naphthalene sulfonate (Fig. 6e)

Larger spacing factors and lower micro air void contents were determined with increasing concrete age. The influence of the air-entraining agent such as occurred with the PCEs was not detected. The total air content also fell (Fig. 5e). This means that with increasing fresh concrete age there is an increasing deviation of the small air voids (deterioration of the air void parameters) and of the large air voids (reduction in total air content) from the fresh concrete.

c) Comparison of the air void parameters with the requirements

The concretes exhibited the required consistencies and air contents 30 minutes and 45 minutes respectively after the end of mixing. The air void parameters determined at these times are listed in Table 6. No systematic influence of the basis of the active substance of the air-entraining agent or of the plasticizer on the air-void parameters was detected. It is necessary to comply with the requirements for the air void parameters given in Table 1 that depend on the testing required (initial, effectiveness or component testing). In spite of a total air content that complied with the requirements the initial testing requirements were not always met. This applied both for combinations with PCEs and for variants with the plasticizer based on naphthalene sulfonate. The reason for this is not a de-foaming action with certain admixture combinations but the consistency of the concrete. A flowable consistency (class F5, flow table spread of 58 cm to 62 cm) had to be established immediately after mixing in the plasticizer in order to achieve the desired very soft consistency (F4, flow table spread 49 cm to 55 cm) after 30 minutes or 45 minutes. Experience shows that the good workability does in fact facilitate the

Tafel 6: LP-Kennwerte und Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Zement/Zusatzmittelkombination
Table 6: Air void parameters and compressive strength relative to the cement/admixture combination

Nr No.	Zement Cement	Zusatzmittel Admixture		LP-Kennwerte Air void parameters		Luftgehalt am Festbeton Air content of hardened concrete	28-Tage Druck- festigkeit 28-day compres- sive strength
				Mikro-Luftporen- gehalt Micro air void content	Abstandsfaktor Spacing factor		
		Fließmittel Plasticizer	LP-Bildner Air-entraining agent	Vol.-% vol. %	mm	Vol.-% vol. %	N/mm ²
1	CEM I	PCE Fertigteil PCE precast element	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	1,7	0,24	7,0	45,1
2			Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	2,4	0,20	7,1	40,5
3		PCE Transport- beton PCE ready-mixed concrete	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	1,8	0,24	6,4	44,3
4			Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	1,5	0,26	6,8	41,5
5	CEM III/A	PCE Fertigteil PCE precast element	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	1,4	0,33	6,6	40,4
6			Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	2,6	0,18	7,5	38,3
7		PCE Transport- beton PCE ready-mixed concrete	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	1,3	0,31	5,0	40,4
8			Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	1,6	0,29	6,0	41,4
9		Naphthalin- sulfonat Naphthalene sulfonate	Mod. Wurzelharz Mod. wood resin	1,9	0,29	6,7	38,0
10			Syn. Tensid 1 Syn. tenside 1	1,6	0,28	6,4	40,5

Zeitpunkten ermittelten LP-Kennwerte sind in Tafel 6 aufgelistet. Ein systematischer Einfluss der Wirkstoffbasis des LP-Bildners bzw. des Fließmittels auf die LP-Kennwerte konnte nicht festgestellt werden. Je nach geforderter Prüfung (Erst-, Wirksamkeits- bzw. Bauteilprüfung) sind die Anforderungen der Tafel 1 an die LP-Kennwerte einzuhalten. Trotz eines anforderungsgerechten Gesamtluftgehalts wurden die Anforderungen an eine Erstprüfung nicht immer eingehalten. Dies galt sowohl für Kombinationen mit PCEs als auch für Varianten mit dem Fließmittel auf Naphthalin-sulfonatbasis. Ursache ist dabei nicht eine entschäumende Wirkung bei bestimmten Zusatzmittelkombinationen, sondern die Konsistenz des Betons. Unmittelbar nach Einmischen des Fließmittels musste eine fließfähige Konsistenz (Klasse F5, Ausbreitmaß 58 cm bis 62 cm) eingestellt werden, um nach 30 Minuten bzw. 45 Minuten die angestrebte sehr weiche Konsistenz (F4, Ausbreitmaß 49 cm bis 55 cm) zu erreichen. Die gute Verarbeitbarkeit erleichtert zwar erfahrungsgemäß die Einführung von Luftporen, erschwert jedoch die Einhaltung der geforderten LP-Kennwerte.

4.2.3.2 Druckfestigkeit

Die 28-Tage-Druckfestigkeiten lagen zwischen 38 N/mm² und 45 N/mm² (Tafel 6). Ein systematischer Einfluss der Zusatzmittelkombination LP/FM konnte nicht festgestellt werden. Entsprechend den Festigkeiten der Zementnormprüfung (CEM I: 56,6 N/mm² bzw. CEM III/A: 52,1 N/mm², Tafel 3) lagen die Druckfestigkeiten der Betone mit CEM III-Zement geringfügig unter denen der Betone mit CEM I-Zement.

5 Modellbildung

5.1 Allgemeines

Aus den Versuchsergebnissen wurde unter Einbeziehung praktischer Erfahrungen und Erkenntnisse über die Wirkungsweise von LP-Bildnern und Fließmitteln ein Modell entwickelt, das die Luftporenbildung in Abhängigkeit vom Zement und der Wirk-

introduction of air voids but it makes it harder to comply with the required air void parameters.

4.2.3.2 Compressive strength

The 28-day compressive strengths lay between 38 N/mm² and 45 N/mm² (Table 6). No systematic influence of the admixture combination of air-entraining agent and plasticizer was detected. The compressive strengths of the concretes made with CEM III cement were slightly below those of the concretes made with CEM I cement, corresponding to the strengths in the cement standard test (CEM I: 56.6 N/mm² and CEM III/A: 52.1 N/mm², Table 3).

5 Modelling

5.1 General

A model that explains air void formation in relation to the cement and the active substances on which the admixtures are based was developed from the test results taking account of the practical experience and findings concerning the mode of operation of air-entraining agents and plasticizers. The conclusions only apply to the variants that were tested as, because of the wide extent of the test, it was only possible to include a limited number of combinations. The concrete production was also taken into account in addition to the starting materials. An understanding of the relationships involved has made it possible to make practical recommendations (see Section 6).

5.2 Starting materials

5.2.1 Admixtures

Air-entraining agents based on natural active substances (vinsol resin) and a synthetic tenside (active substance alkyl polyglycol ether sulfate) were used in the concrete tests. Because of its poor solubility vinsol resin is to a large extent precipitated in the pore

stoffbasis der Zusatzmittel erklärt. Die Schlussfolgerungen gelten nur für die geprüften Varianten, da wegen des großen Versuchsumfangs nur eine begrenzte Anzahl an Kombinationen einbezogen werden konnte. Neben den Ausgangsstoffen wird auch die Betonherstellung berücksichtigt. Die Kenntnis der Zusammenhänge ermöglicht, Empfehlungen für die Praxis zu geben (siehe Abschnitt 6).

5.2 Ausgangsstoffe

5.2.1 Zusatzmittel

In den Betonversuchen wurden LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis (Vinsolharz) und ein synthetisches Tensid (Wirkstoff Alkylpolyglycolethersulfat) verwendet. Vinsolharz fällt infolge der schlechten Löslichkeit zum größten Teil in der Porenlösung aus. Das synthetische Tensid hingegen weist eine sehr gute Löslichkeit auch bei hohen Zugabemengen auf. Als Fließmittel wurden herkömmliche Fließmittel und PCE verwendet. Die klassischen Fließmittel auf Melamin- bzw. Naphthalinsulfonat-Basis haben eine hohe Ladungsdichte und sorbieren innerhalb kurzer Zeit stark an positiv geladene Bereiche der Zementpartikel oder erster Hydratationsprodukte. Die PCE weisen eine geringere Ladungsdichte als klassische Fließmittel auf. PCE für den Transportbetonbereich sollen die Verarbeitbarkeit über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten und haben daher im Vergleich zu den PCE für den Fertigteilbereich eine geringere Ladungsdichte. Als Folge ist die sorbierte Menge an PCE geringer, sodass größere Anteile an PCE im Porenwasser gelöst vorliegen und für eine Nachdispersion und die Aufrechterhaltung der Verarbeitbarkeit zur Verfügung stehen.

5.2.2 Zement

Betone mit CEM III-Zement erfordern zur Einstellung des Luftgehalts i.d.R. höhere LP-Bildner-Zugabemengen als Betone mit CEM I-Zement. Die größere Oberfläche des feineren CEM III-Zements bewirkt eine vermehrte Sorption der LP-Bildner-Moleküle.

5.3 Mischen des Betons

5.3.1 Zugabe des LP-Bildners

Bei der Modellbildung wird die Mischreihenfolge berücksichtigt: Erst Einmischen des LP-Bildners, dann Zugabe des Fließmittels. Direkt nach dem Mischen von Zement und Wasser lagern sich positive Calciumionen an Zement- bzw. Gesteinspartikel an bzw. liegen gelöst in der Porenlösung vor. Ein Teil des im Zugabewassers dissoziierten LP-Bildners wird an positiv geladene Teilbereiche der Feststoffpartikel sorbiert. Ein anderer Teil reagiert mit den in der Porenlösung vorliegenden Calciumionen. Die dabei gebildeten Calciumsalze weisen wirkstoffabhängig eine unterschiedliche Löslichkeit auf. Die Calciumsalze der LP-Bildner auf Vinsolharzbasis sind sehr schlecht löslich und fallen zum großen Teil in der Porenlösung aus. Das Calciumsalz des Wirkstoffs Alkylpolyglycolethersulfat verbleibt infolge der guten Löslichkeit aktiv in der Porenlösung. Die während des Mischvorgangs eingeführte Luft wird von den LP-Bildner-Molekülen stabilisiert. Die Luftblasen heften an die Feststoffpartikel an. Nach der zweiminütigen Mischdauer ist der LP-Bildner vollständig aktiviert und es hat sich ein stabiles Luftporengefüge gebildet. Wird LP-Bildner infolge verkürzter Mischdauer bei der Herstellung überdosiert, verbleibt beim natürlichen LP-Bildner ein geringer und beim synthetischen LP-Bildner ein größerer Wirkstoffanteil aktiv in der Porenlösung. Bei einem nachträglichen Mischvorgang (z.B. drehende Trommel im Fahrmischer) werden Luftblasen stabilisiert, sodass der Luftgehalt bei Einsatz eines gut löslichen Tensids ansteigen kann [3].

5.3.2 Zugabe des Fließmittels (erst LP, dann FM)

Das Fließmittel weist wie der LP-Bildner eine negative Ladung auf und wird an Feststoffpartikel sorbiert. Nach der Fließmittel-Zugabe werden entsprechend der Ladungsdichte des Fließmittels mehr oder weniger bereits sorbierte LP-Bildner-Moleküle von Feststoffpartikeln verdrängt und gelangen zurück in die Porenlösung. Außerdem werden während des Mischvorgangs Luftblasen

gelöst. On the other hand, the synthetic tenside has a very good solubility even when large quantities are added. Conventional plasticizers and PCE were used as the plasticizers. The classical plasticizers based on melamine and naphthalene sulfonates have a high charge density and within a short time are sorbed strongly onto positively charged areas of the cement particles or initial hydration products. The PCEs have lower charge densities than the classical plasticizers. The PCEs for the ready-mixed concrete sector are intended to maintain the workability over an extended period and therefore have lower charge densities than the PCEs for the precast element sector. The consequence is that less PCE is sorbed with the result that large quantities of PCE are present in a dissolved state in the pore water and are available for redispersion and for maintaining the workability.

5.2.2 Cement

As a rule, concretes made with CEM III cement require larger quantities of added air-entraining agent to adjust the air content than concretes made with CEM I cement. The larger surface area of the finer CEM III cement causes increased sorption of the air-entraining agent molecules.

5.3 Mixing the concrete

5.3.1 Addition of the air-entraining agent

The mixing sequence was taken into account in the modelling: the air-entraining agent is mixed in first and then the plasticizer is added. Immediately after the cement and water are mixed positive calcium ions settle on cement aggregate particles or are present dissolved in the pore solution. Part of the air-entraining agent dissociated in the mixing water is sorbed on positively charged areas of the solid particles. Another part reacts with the calcium ions present in the pore solution. The calcium salts that are formed have different solubilities depending on the active substance. The calcium salts of the air-entraining agents based on vinsol resin are very sparingly soluble and are largely precipitated in the pore solution. Because of its good solubility the calcium salt of the alkyl polyglycol ether sulfate active substance remains active in the pore solution. The air introduced during the mixing process is stabilized by the molecules of the air-entraining agent. The air bubbles attach themselves to the solid particles. After the two-minute mixing time the air-entraining agent is fully activated and a stable air void microstructure has formed. If excess air-entraining agent has been added as the result of a shortened mixing time during production then small amounts of active substance (natural air-entraining agent) or large amounts (synthetic air-entraining agent) remain active in the pore solution. During any subsequent mixing process (e.g. rotating drum in a truck mixer) the air bubbles become stabilized, with the result that the air content can rise if a readily soluble tenside is used [3].

5.3.2 Addition of the plasticizer (first air-entraining agent, then plasticizer)

Like the air-entraining agents the plasticizer has a negative charge and is sorbed onto solid particles. After the addition of the plasticizer varying amounts (depending on the charge density of the plasticizer) of the air-entraining agent molecules are displaced from the solid particles and return to the pore solution. Air bubbles are also destroyed during the mixing process and further air-entraining molecules are transferred to the pore solution.

a) PCE-based plasticizers

The air void formation is hardly affected by the nature of the PCE (ready-mixed concrete or precast element). After the PCE has been added, sorbed molecules of air-entraining agent are displaced from the cement and aggregate particles. Because of the higher proportion of sorbed air-entraining agent with CEM III cement the amount of air-entraining agent molecules released is higher with CEM III cement than with CEM I cement. The formation of air voids while the PCE is being mixed in is heavily influenced by the basis of the active substance in the air-entraining agent.

zerstört und weitere LP-Bildner-Moleküle in die Porenlösung verbracht.

a) Fließmittel auf PCE-Basis

Die Luftporenbildung wird kaum durch die Art des PCEs (Transportbeton bzw. Fertigteil) beeinflusst. Nach der PCE-Zugabe werden u.a. sorbierte LP-Bildner-Moleküle von Zement- bzw. Gesteinspartikeln verdrängt. Infolge des höheren Anteils an sorbiertem LP-Bildner bei CEM III-Zement fällt der Anteil freigesetzter LP-Bildnermoleküle beim CEM III-Zement höher aus als beim CEM I-Zement. Die Luftporenbildung während des Einmischens des PCEs wird durch die Wirkstoffbasis des LP-Bildners entscheidend beeinflusst.

■ LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis

Nach Einmischen des PCEs fällt der Luftgehalt ab, da sorbierte LP-Bildner-Moleküle verdrängt werden und einige angeheftete Luftblasen sich ablösen. Die freigesetzten LP-Bildner-Moleküle fallen aufgrund der geringen Löslichkeit in der Porenlösung aus und können keine Luftblasen mehr stabilisieren. Bei dem natürlichen LP-Bildner muss daher vor der Zugabe des PCE ein höherer Luftgehalt als vorgesehen eingestellt werden, um das Absinken nach PCE-Zugabe auszugleichen. Der hohe Luftgehalt bewirkt anfangs auch günstigere LP-Kennwerte. Nach Einmischen des Fließmittels entweichen sowohl kleine als auch große Luftblasen aus dem Frischbeton. Als Folge fällt der Luftgehalt ab und die LP-Kennwerte verschlechtern sich.

■ LP-Bildner mit synthetischer Wirkstoffbasis

Die während der PCE-Zugabe freigesetzten LP-Bildnermoleküle sind gut löslich und verbleiben daher aktiv in der Porenlösung. Während des Einmischens des PCE werden eingetragene Luftblasen stabilisiert und der Luftgehalt steigt an. Zum Ausgleich muss daher vor der PCE-Zugabe ein geringerer Luftgehalt als vorgesehen eingestellt werden. Dies bedingt auch die ungünstigen LP-Kennwerte. Während der PCE-Zugabe werden kleine und große Luftblasen stabilisiert. Dies bewirkt einen Anstieg des Luftgehalts und verbesserte LP-Kennwerte.

b) Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis

Unabhängig vom Wirkstoff des LP-Bildners musste vor der Fließmittel-Zugabe ein wesentlich höherer Luftgehalt als gewünscht eingestellt werden. Hierzu waren im Vergleich zu den Betonen mit PCE die höchsten LP-Bildnermengen erforderlich. Nach Zugabe des Fließmittels verringerte sich der Luftgehalt und verschlechterten sich die LP-Kennwerte unabhängig von der Wirkstoffbasis des LP-Bildners. Eine Ursache könnte in einer entschäumenden Wirkung des Fließmittels liegen, von der dann beide LP-Bildner wirkstoffunabhängig gleichermaßen betroffen sein müssten. Eine nennenswerte entschäumende Wirkung konnte jedoch z.B. in den Versuchen an Feinbetonen nicht nachgewiesen werden.

Im Gegensatz zu den PCE ist keine wirkstoffabhängige Luftporenbildung zu verzeichnen. Ursache ist möglicherweise die hohe Ladungsdichte des Naphthalinsulfonats, die zu einer stärkeren Sorption des Fließmittels führt. Dadurch werden mehr LP-Bildnermoleküle und angeheftete Luftblasen von den Feststoffpartikeln verdrängt. Bei den Kombinationen „PCE mit synthetischem Tensid“ werden während des Einmischens des PCEs neue Luftblasen stabilisiert und der Luftgehalt steigt an. Dies ist bei der Variante mit Naphthalinsulfonat nicht der Fall. Ursache ist vermutlich, dass neu gebildete Luftblasen nicht mehr anheften können, da das Naphthalinsulfonat stärker sorbiert als die PCE und die Sorptionsplätze durch das Fließmittel belegt sind. Als Folge ist das Luftporengefüge nicht stabil, sowohl kleine (Verschlechterung der LP-Kennwerte) als auch große Luftblasen (Verringerung des Luftgehalts) entweichen mit zunehmendem Alter aus dem Frischbeton.

c) Luftporensystem

Trotz eines anforderungsgerechten Gesamtluftgehalts wurden die Anforderungen an eine Erstprüfung nicht immer eingehalten. Dies galt sowohl für Kombinationen mit PCE als auch und für Kom-

– Air-entraining agents based on natural active substances

After the PCE has been mixed in the air content drops because the sorbed air-entraining agent molecules are displaced and some attached air bubbles become detached. Because of their low solubility the air-entraining agent molecules that have been released are precipitated in the pore solution and can no longer stabilize any air bubbles. With the natural air-entraining agent it is therefore necessary, before the PCE is added, to set up a higher air content than required in order to offset the drop after addition of the PCE. The high air content also initially produces better air void parameters. After the plasticizer has been mixed in, both small and large air bubbles escape from the fresh concrete. As a consequence the air content falls and the air void parameters deteriorate.

– Air-entraining agents based on synthetic active substances

The air-entraining agent molecules released during the addition of PCE are readily soluble and therefore remain active in the pore solution. Air bubbles introduced while the PCE is being mixed in become stabilized and increase the air content. To compensate for this it is therefore necessary, before the PCE is added, to set up a lower air content than required. This also results in unfavourable air void parameters. Small and large air bubbles become stabilized during the addition of PCE. This causes an increase in air content and improved air void parameters.

b) Plasticizers based on naphthalene sulfonate

A substantially higher air content than required had to be established before the plasticizer was added, regardless of the active substance in the air-entraining agent. This needed very large quantities of air-entraining agent compared with the concretes made with PCE. After addition of the plasticizer the air content is reduced and the air void parameters deteriorate, regardless of the active substance on which the air-entraining agent is based. One reason for this could be a de-foaming action of the plasticizer that would then have to affect the two air-entraining agents equally, regardless of the active substance. However, no appreciable de-foaming action was detected in the tests with fine concrete.

Unlike the situation with the PCEs, no dependence of the air void formation on the basis of the active substance was detected. The reason is possibly the high charge density of the naphthalene sulfonate, which leads to greater sorption of the plasticizer. As a result more air-entraining agent molecules and attached air bubbles are displaced from the solid particles. With the combination of PCE with synthetic tenside new air bubbles become stabilized while the PCE is being mixed in and the air content rises. This is not the case with the variants containing naphthalene sulfonate. The reason is presumably that newly formed air bubbles are no longer able to attach themselves because the naphthalene sulfonate is more strongly sorbed than the PCE and the sorption sites are occupied by the plasticizer. As a consequence the air void microstructure is not stable – both small air bubbles (deterioration of the air void parameters) and large air bubbles (reduction of the air content) escape from the fresh concrete with increasing age.

c) Air void system

The requirements were not always met in an initial test even though the total air content complied with the requirements. This applied both for combinations with PCE and for combinations with the plasticizer based on naphthalene sulfonate. For the variants examined the reason lay not in a de-foaming action with certain air-entraining agent/plasticizer combinations but in the consistency of the concrete. A flowable consistency had to be established immediately after addition of the plasticizer in order to achieve the desired very soft consistency (F4, flow table spread 49 cm to 55 cm) after 30 minutes or 45 minutes. This means that the air void formation took place in a concrete with a flowable consistency and experience shows that this makes it harder to form an air void system with air void parameters that comply with the requirements. Conventional plasticizers may only be effective for a limited time so these are added to the truck mixer on the construction site before delivery. Because of their good plasticizing action

binationen mit dem Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis. Ursache war in den untersuchten Varianten nicht eine entschäumende Wirkung bei bestimmten LP/FM-Kombinationen, sondern die Konsistenz des Betons. Unmittelbar nach Zugabe des Fließmittels musste eine fließfähige Konsistenz eingestellt werden, um nach 30 Minuten bzw. 45 Minuten die angestrebte sehr weiche Konsistenz (F4, Ausbreitmaß 49 cm bis 55 cm) zu erreichen. Die Luftporenbildung erfolgte somit in einem Beton mit fließfähiger Konsistenz, die erfahrungsgemäß die Bildung eines Luftporensystems mit anforderungsgerechten LP-Kennwerten erschwert. Da die Wirksamkeit herkömmlicher Fließmittel zeitlich begrenzt sein kann, werden diese auf der Baustelle im Fahrmischer vor der Übergabe zugegeben. Infolge der guten verflüssigenden Wirkung werden PCE oft direkt im Betonwerk zugegeben. Dies kann möglicherweise neben der größeren Empfindlichkeit der PCE ein Grund für die aus der Praxis berichtete Beeinträchtigung der LP-Bildung sein.

5.3.3 Veränderung der Zugabereihenfolge der Zusatzmittel

Wenn bei gleich bleibender Zusatzmittel-Zugabemenge die Reihenfolge „erst LP, dann FM“ verändert wird (z.B. gleichzeitige Zugabe der Zusatzmittel oder „erst FM, dann LP“), findet die Luftporenbildung in einem Beton mit weicherer Konsistenz statt. Eine weichere Konsistenz erleichtert die Einführung von Luftporen. Bei gleich bleibender Zusatzmittel-Zugabemenge steigt der Luftgehalt daher zwangsläufig an. Eine ungleichmäßige Reihenfolge der Zusatzmittelzugabe vergrößert die Streuung des Luftgehalts, insbesondere wenn ein gut löslicher LP-Bildner verwendet wird. LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis sind in dieser Hinsicht wesentlich robuster.

5.3.4 Zugabe des Fließmittels auf der Baustelle

In den Laborversuchen wurde das Fließmittel bereits bei der Herstellung des Betons zugegeben. In der Praxis wird das Fließmittel oft am Einbauort auf der Baustelle in den Fahrmischer dosiert. Wenn der Beton zu diesem Zeitpunkt eine größere Menge an nicht aktiviertem LP-Bildner (Ursache Überdosierung LP-Bildner infolge verkürzter Mischdauer) enthält, kann der Luftgehalt ansteigen.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

6.1 Zusammenfassung

Aus der Praxis wurde über Probleme bei der Herstellung von LP-Beton in Kombination mit der Verwendung von Fließmitteln, insbesondere auf der Basis von PCE, berichtet. Der Luftgehalt insgesamt schwankte und vereinzelt wurden trotz Einhaltung des Gesamtluftgehalts im Frischbeton die am Festbeton ermittelten Anforderungen an die LP-Kennwerte nicht erreicht. In einem Forschungsvorhaben wurde untersucht, inwieweit Wechselwirkungen zwischen LP-Bildner und Fließmittel das Luftporengefüge beeinflussen können. Die verbesserte Kenntnis der Wirkungsmechanismen bei der kombinierten Verwendung beider Zusatzmittel ermöglicht es, zielgerichtet „robuste“ Zusatzmittelkombinationen auszuwählen und das Risiko von Fehlanwendungen zu verringern.

Zur Abschätzung der Beeinflussung der Luftporenbildung und einer etwaigen entschäumenden Wirkung der jeweiligen LP-Bildner/Fließmittel/Zement-Kombination wurden Feinbetone mit einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% hergestellt und anschließend Fließmittel in mehreren Stufen zugegeben. Nach jeder Teilzugabe wurde der Luftgehalt bestimmt. Danach wurden mit ausgewählten Kombinationen LP/FM/Zement Betone mit einem Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% und einem Ausbreitmaß entsprechend der Konsistenzklasse F4 hergestellt.

Bei den Untersuchungen an Feinbetonen wurde in keinem Fall eine entschäumende Wirkung des Fließmittels festgestellt. Der Luftgehalt stieg mit zunehmender Fließmittel-Dosierung an. Das Ausmaß des Anstiegs fiel bei Verwendung des LP-Bidners mit natürlicher Wirkstoffbasis gering aus, während beim synthetischen Tensid ein starker Anstieg zu verzeichnen war. Ursache der unterschiedlichen Luftporenbildung ist, dass nach der Fließmittel-Zugabe LP-Bildnermoleküle zurück in die Porenlösung gelangen. Während des Einmischens des Fließmittels werden Luftblasen

PCEs oft direkt an der Betonpflanzung. Alongside the greater sensitivity of the PCEs this may possibly be a reason for the adverse effect on air void formation reported from practice.

5.3.3 Changing the sequence of adding the admixtures

If, with the same addition quantities of admixtures, the sequence “first air-entraining agent, then plasticizer” is changed (e.g. simultaneous addition of the admixtures or “first plasticizer, then air-entraining agent”) the air voids are formed in a concrete with a softer consistency, which facilitates the introduction of air voids. With the same addition quantity of admixtures the air content then inevitably rises. An irregular sequence of admixture addition increases the scatter of the air content, especially if a readily soluble air-entraining agent is used. Air-entraining agents based on natural active substances are substantially more robust in this respect.

5.3.4 Addition of the plasticizer on the construction site

In the laboratory trials the plasticizer was added during the production of the concrete. In practice the plasticizer is often added to the truck mixer on the construction site at the point of placement. The air content may rise if at this time the concrete contains a fairly large quantity of unactivated air-entraining agent (caused by addition of excess air-entraining agent due to a shortened mixing time).

6 Summary and practical recommendations

6.1 Summary

There have been reports of problems that have arisen in practice during the production of air-entrained concrete when using plasticizers, especially those based on polycarboxylate ether (PCE). The total air content fluctuates and in individual cases the requirements for the air void parameters measured on the hardened concrete are not met in spite of the fact that the total air content in the fresh concrete complies with the requirements. The extent to which interactions between air-entraining agents and plasticizers can affect the air void microstructure was investigated in a research project. Improved understanding of the action mechanisms during combined use of the two admixtures permits carefully controlled selection of “robust” admixture combinations and a reduction in the risk of unwanted air void formation.

Fine concretes were produced with an air content of about 5.5 vol. % and plasticizer was then added in several stages to estimate the influence on air void formation and a possible de-foaming effect of the particular air-entraining agent/plasticizer/cement combination. The air content was determined after each addition stage. Concretes with an air content of about 5.5 vol. % and a flow table spread corresponding to consistency class F4 were then produced with selected air-entraining agent/plasticizer/cement combinations.

No instance of a de-foaming action of the plasticizer was found in the investigations on fine concretes. The air content increased with rising addition level of plasticizer. The extent of the increase was low when using air-entraining agents based on natural active substances, while a greater increase was recorded with the synthetic tenside. The reason for the different air void formation is that air-entraining agents are passed back into the pore solution after the addition of the plasticizer. Air bubbles are stabilized while the plasticizer is being mixed in. With a sparingly soluble natural air-entraining agent most of the air-entraining agent that has been “released” is precipitated and there is only a slight increase in air content. The air content can increase more sharply with a readily soluble synthetic tenside.

The concrete tests were used primarily to investigate the influence of the air-entraining agent/plasticizer/cement combination and the age of the fresh concrete on the air content and the air void parameters. First of all the quantities of air-entraining agent and plasticizer added that were needed to achieve the required air content and the desired workability were established. With the air-entraining agents the synthetic air-entraining agents proved to be substantially more effective regardless of the chosen cement/plasticizer combination. More air-entraining agent had to be added to

stabilisiert. Bei einem schlecht löslichen natürlichen LP-Bildner fällt der größte Anteil an „freigesetztem“ LP-Bildner aus und der Luftgehalt erhöht sich nur geringfügig. Bei einem gut löslichen synthetischen Tensid kann der Luftgehalt stärker ansteigen.

In den Betonversuchen wurde vorrangig der Einfluss der Kombination LP-Bildner/Fließmittel/Zement und des Frischbetonalters auf den Luftgehalt und die LP-Kennwerte untersucht. Zunächst wurde die erforderliche Zugabemenge an LP-Bildner und Fließmittel festgelegt, um den geforderten Luftgehalt und die gewünschte Verarbeitbarkeit zu erreichen. Bei den LP-Bildnern erwies sich der synthetische LP-Bildner unabhängig von der gewählten Zement/Fließmittel-Kombination als wesentlich wirksamer. Beim CEM III-Zement musste die LP-Bildner-Zugabemenge im Vergleich zum CEM I-Zement erhöht werden. Die Art des PCEs beeinflusste die Zugabemenge des LP-Bildners nicht nennenswert, dies galt für beide Zemente. Bei Betonen mit Naphthalinsulfonat wurden die höchsten Zugabemengen an LP-Bildner benötigt. Die erforderliche Fließmittel-Zugabemenge zur Einstellung der gewünschten Konsistenz wurde durch die Wirkstoffbasis des LP-Bildners und die Zementart nicht nennenswert beeinflusst. Beim PCE Fertigteil wurde die geringste und beim Naphthalinsulfonat die höchste Fließmittel-Zugabemenge benötigt. Das PCE Transportbeton lag im mittleren Bereich.

Der zeitliche Verlauf der Luftporenbildung (Frisch- und Festbeton) wurde nach dem Einmischen des LP-Bildners, nach der Fließmittel-Zugabe (Mischende) und anschließend 10, 30, 45 und 60 Minuten nach Mischende ermittelt. Die Betone mit den beiden PCE (Transportbeton- und Fertigteilbereich) zeigten hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Luftgehalts und der LP-Kennwerte einen ähnlichen Verlauf. Nach dem einminütigen Einmischen des PCEs (Mischende) wurde bei Einsatz des LP-Bildners mit natürlicher Wirkstoffbasis ein Absinken des Luftgehalts in Kombination mit einer Verschlechterung der LP-Kennwerte und beim synthetischen LP-Bildner ein Anstieg des Luftgehalts und eine Verbesserung der LP-Kennwerte festgestellt. Die Luftgehaltsabsenkung fiel beim natürlichen LP-Bildner bei Verwendung des CEM III-Zements geringer aus als beim CEM I-Zement. Der Anstieg beim synthetischen LP-Bildner war beim CEM III-Zement stärker ausgeprägt als beim CEM I-Zement. Bei Verwendung des Naphthalinsulfonats verringerten sich nach Zugabe des Fließmittels unabhängig von der Wirkstoffart des LP-Bildners die Luftgehalte und verschlechterten sich die LP-Kennwerte.

Trotz eines anforderungsgerechten Gesamtluftgehalts wurden die Anforderungen an die LP-Kennwerte nicht immer eingehalten. Dies galt sowohl für Kombinationen mit PCE als auch beim Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis. Ursache ist dabei nicht eine entschäumende Wirkung bei bestimmten Zusatzmittelkombinationen, sondern die Konsistenz des Betons. Unmittelbar nach Einmischen des Fließmittels musste eine fließfähige Konsistenz (Klasse F5, Ausbreitmaß 58 cm bis 62 cm) eingestellt werden, um nach 30 Minuten bzw. 45 Minuten die angestrebte sehr weiche Konsistenz (F4, Ausbreitmaß 49 cm bis 55 cm) zu erreichen. Die gute Verarbeitbarkeit erleichtert zwar erfahrungsgemäß die Einführung von Luftporen, erschwert jedoch die Einhaltung der geforderten LP-Kennwerte.

6.2 Empfehlungen für die Praxis

Die im Modell erläuterten Zusammenhänge ermöglichen es, der bauausführenden Industrie und den Herstellern von Zusatzmitteln und Mischanlagen folgende Empfehlungen zu geben:

a) Hersteller des Luftporenbetons: Bauindustrie oder Transportbetonwerke
Die Zugabe-Reihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel beeinflusst bei Annahme gleich bleibender Zusatzmittelmengen entscheidend die Luftporenbildung. Bei der Herstellung des Betons in der Praxis ist darauf zu achten, dass die gewählte Mischreihenfolge und die Mischdauer eingehalten werden. Der LP-Bildner sollte zuerst und anschließend das Fließmittel zugegeben werden. Bei Änderungen der LP-Bildnermenge (Überdosierung) und der Mischreihenfolge sind insbesondere bei LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis infolge der guten Löslichkeit größere Auswirkungen zu erwarten.

the CEM III cement than to the CEM I cement. The nature of the PCE had no appreciable influence on the quantity of air-entraining agent added, and this applied to both cements. The greatest quantities of air-entraining agent were required for concretes containing naphthalene sulfonate. The quantity of plasticizer needed to achieve the required consistency was not appreciably influenced by the active substance in the air-entraining agent or by the type of cement. The smallest quantity of plasticizer was needed with the PCE precast element and the largest with the naphthalene sulfonate. The PCE ready-mixed concrete lay in the middle.

The behaviour with time of the air void formation (fresh and hardened concrete) was determined after the air-entraining agent was mixed in, after the addition of the plasticizer (end of mixing) and then 10, 30, 45 and 60 minutes after the end of mixing. The concretes with the two PCEs (ready-mixed concrete and precast element sectors) exhibited similar behaviour patterns with respect to the development with time of the air content and the air void parameters. After the one-minute mixing of the PCE (end of mixing) a drop in air content combined with a deterioration of the air void parameters was established when using the air-entraining agent based on a natural active substance, and with the synthetic air-entraining agent there was a rise in air content and improvement in the air void parameters. With the natural air-entraining agent the drop in air content was less when using the CEM III cement than with the CEM I cement. With the synthetic air-entraining agent the increase was more strongly marked with the CEM III cement than with the CEM I cement. When using naphthalene sulfonate the air content fell and the air void parameters deteriorated after addition of the plasticizer regardless of the type of active substance in the air-entraining agent.

The requirements for the air void parameters were not always met in spite of a total air content that satisfied the requirements. This applied both to combinations with PCEs and with plasticizers based on naphthalene sulfonate. The cause of this is not a de-foaming action with certain admixture combinations but the consistency of the concrete. Immediately after the plasticizer has been mixed in a flowable consistency (class F5, flow table spread 58 cm to 62 cm) had to be established to achieve the very soft consistency required (F4, flow table spread 49 cm to 55 cm) after 30 minutes or 45 minutes. Experience shows that the good workability does in fact assist the introduction of air voids, but it makes it more difficult to maintain the required air void parameters.

6.2 Practical recommendations

The interrelationships described in the model make it possible to give the following recommendations to the industry carrying out the construction work and to the producers of admixtures and mixing plants:

a) Producers of air-entrained concrete: construction industry or ready-mixed concrete plants

Assuming the same quantities of admixtures the sequence of addition of air-entraining agent and plasticizer has a decisive influence on the air void formation. During the production of the concrete care must be taken in practice to ensure that the chosen mixing sequence and mixing time are retained. The air-entraining agent should be added first and then the plasticizer. If there are changes in the quantity of air-entraining agent (overdosing) and the mixing sequence then fairly major effects can be expected, especially with air-entraining agents based on synthetic active substances due to their good solubility.

The air content may increase if there is subsequent input of mixing energy (e.g. during transport in the mixer truck with rotating drum or during placement with a screw conveyor). This is particularly the case if plasticizer is added subsequently to the mixer truck on the construction site. The better workability then once again assists the air void formation. A large proportion of air-entraining agents based on natural active substances are precipitated in the pore solution, so any influence, e.g. from overdosing, has less effect. Admixture combinations of air-entraining agent and plasticizer containing air-entraining agents based on natural active substances

Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie (z.B. während des Transports in Fahrmischern mit drehender Trommel oder beim Einbau mit Förderschnecken) kann der Luftgehalt ansteigen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Fließmittel nachträglich auf der Baustelle in den Fahrmischer zugegeben wird. Die bessere Verarbeitbarkeit erleichtert dann nochmals die Luftporenbildung. LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis fallen zu einem großen Anteil in der Porenlösung aus, daher haben Einflüsse z.B. aus Überdosierung geringere Auswirkungen zur Folge. Zusatzmittelkombinationen LP/FM mit LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis sind daher als „robuster“ zu bezeichnen als Varianten mit synthetischen LP-Bildnern.

b) Zusatzmittelindustrie

LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis neigen weniger zum Nachaktivieren. Nachteilig ist, dass der Luftgehalt oft nur mit hohen Zugabemengen angehoben werden kann. Mit einer synthetischen Wirkstoffkomponente könnte die Luftporenbildung verbessert werden, ohne das Nachaktivierungspotenzial nennenswert zu steigern. Möglicherweise lässt sich mit LP-Bildner-Gemischen aus synthetischen und natürlichen Wirkstoffen bei der gemeinsamen Verwendung mit Fließmitteln eine robustere Luftporenbildung erzielen.

c) Baumaschinenindustrie

Die Mischanlagen sollten mit zwei Zusatzmitteldosieranlagen ausgestattet und die Steuerungsprogramme so ausgelegt sein, dass die Dosiereinrichtungen unabhängig voneinander vom Mischerführer bedient werden können. Der Zugabezeitpunkt sollte frei wählbar sein.

Die Forschung wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert (IGF-Vorhaben 15545 N).

are therefore considered “more robust” than variants with synthetic air entraining agents.

b) Admixture industry

The air-entraining agents based on natural active substances are less inclined to reactivation. The disadvantage is that the air content can often only be raised with high addition levels. With a synthetic active substance component the air void formation could be improved without appreciably increasing the reactivation potential. More robust air void formation could possibly be achieved with air-entraining agent mixtures of synthetic and natural active substances when used together with plasticizers.

c) Construction machinery industry

The mixing plants should be equipped with two admixture dispensing systems and the control programme should be designed so that the dispensing devices can be operated by the mixer operator independently of one another. The time of addition should be freely selectable.

The research was assisted by the Federal Ministry for Economic Affairs and Technology through the AiF (Federation of Industrial Research Associations) as part of the IGF programme to promote joint industrial research and development (IGF project 15545 N).

Literatur / Literature

- [1] Deutsche Bauchemie e.V.: Betonzusatzmittel und Umwelt. Sachstandsbericht Mai 1999
- [2] Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P.: Chemical Admixtures for Concrete. 2nd Edition, E. & F. N. Spon, London 1986
- [3] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 73, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2009
- [4] König, G.; Viet Tue, N.; Zink, M.: Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung. Verlag Ernst und Sohn, Berlin 2001
- [5] Rickert, J.: Zeta-Potenzial und Rheologie von Zementleimen – Einfluss von Fließmittel sowie Hüttensand und Kalkstein. beton 60 (2010) H. 7, S. 315–320, und H. 8, S. 363–365
- [6] Spanka, G.; Grube H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. beton 45 (1995) H. 11, S. 802–808 und H. 12, S. 876–881
- [7] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004
- [8] Pigeon, M.; Plante, P.; Pleau, R.; Banthia, N.: Influence of soluble alkalies on the production and stability of the air-void system in superplasticized and non-superplasticized concrete. ACI Materials Journal 89 (1992), S. 24–31
- [9] Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 45 (1995) H. 10, S. 724–730
- [10] Herstellen von Luftporenbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 68 (2002) H. 1, S. 46–52
- [11] Kottas, R.; Hilsdorf, H.: Der Einfluss der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, H. 274, Bonn 1979
- [12] Bruere, G. M.: The relative importance of various physical and chemical factors on bubble characteristics in cement pastes. Australian Journal of Applied Science 12 (1961) H. 1, S. 78–86

Roland Pierkes, Jörg Rickert, Düsseldorf

Auswirkung von Sanden auf die Bewertung potenziell alkalireaktiver Gesteinskörnungen

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

Übersicht

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

1 Anlass für den Forschungsantrag/Ausgangssituation

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

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

Abstract

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

1 Reason for the research request/initial situation

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

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

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

eventuelle Rissbildung durch eine schädigende Alkalireaktion beobachten zu können.

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

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

2 Untersuchungsprogramm

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

Im zweiten Schritt wurden die Sande in Kombination mit dem vorgeschriebenen Prüfzement (CEM I mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,3 ± 0,1 M.-%) Schnelltests in Anlehnung an das Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) nach der Alkali-Richtlinie unterzogen, wobei die Gesamtagerungsdauer von 13 Tagen auf 28 Tage ausgedehnt wurde. Proben, die eine signifikante Dehnung aufwiesen, wurden anhand von Dünnschliffen lichtmikroskopisch auf mögliche Schadensbilder untersucht. Ausgewählte Sande wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens auch in Kombination mit einem CEM I (st) und einem CEM II/B-S geprüft, um die Aussagefähigkeit des Prüfverfahrens im Hinblick auf die Bewertung von Straßendeckenbeton zu überprüfen.

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

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

2 Investigation programme

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

In the second step the sands were combined with the above-mentioned test cement (CEM I with an Na₂O equivalent of 1.3 ± 0.1 mass %) and submitted to accelerated tests using the accelerated mortar test method (reference method) described in the Alkali Guidelines, although the total storage time was extended from 13 days to 28 days. Thin sections of the samples that exhibited significant expansion were examined under a light-optical microscope for possible appearance of damage. In a continuation of the research project selected sands were also tested in combination with CEM I (st) and CEM II/B-S cements in order to check the informative value of the test method for evaluating road paving concrete.

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

^{*)} Gemäß DIN 1164:1958 (im Folgenden als “Normensand” bezeichnet)

^{*)} According DIN 1164:1958 (further on designated as “standard sand”)

Für die Betonversuche war eine Auswahl von unterschiedlich reaktiven, groben Gesteinskörnungen zu treffen, die mit den Prüfsanden zu Betonsieblinien kombiniert wurden. Als inerte Gesteinskörnung wurde wiederum reiner Kalksteinsplitt verwendet. Weiterhin wurde reaktiver Grauwacke- und Kies-Edelsplitt sowie punktuell ein nur geringfügig reaktiver Splitt (sogenannte „slow/late“-Körnung, bezeichnet als „G4“) eingesetzt. Die Kombinationen mit ausgewählten Prüfsanden erfolgten auf Basis der Ergebnisse der ersten beiden Arbeitsschritte. Alle Betone wurden zunächst mit dem Prüfzement nach Alkali-Richtlinie hergestellt und mit dem Betonversuch bei 40 °C-Nebelkammerlagerung sowie dem 60 °C-Betonversuch gemäß Teil 3 der Alkali-Richtlinie untersucht. Aus den Betonversuchen wurde eruiert, ob und in welchem Umfang die Reaktivität des Prüfsandes die Prüfergebnisse im Betontest beeinflusst. Wenn das Dehnungsverhalten eines Betons deutlich von dem der Referenzmischung mit dem inerten Kalksteinbrechsand abwich, wurde an Dünnschliffen lichtmikroskopisch das Schadensbild bestimmt. Weiterhin wurden Betonversuche mit dem Portlandzement CEM I (st) mit einem Na₂O-Äquivalent von 0,78 M.-% durchgeführt, um die Auswirkung eines verringerten Alkaliangebotes auf die Reaktivität des Sandes im Beton zu ermitteln. Im Hinblick auf die zunehmende Anwendung von hüttensandhaltigen Zementen im Straßenbau erfolgten ergänzende Versuche an Betonen mit einem CEM II/B-S, der ein Na₂O-Äquivalent von etwa 0,9 M.-% aufwies. Die Zusammensetzung der Zemente ist in Tafel 1 aufgeführt. Die Mischungszusammensetzung aller Betone entsprach den Vorgaben des Teils 3 der Alkali-Richtlinie.

vestigated with the concrete test using the 40 °C fog chamber storage and the 60 °C concrete test as described in Part 3 of the Alkali Guidelines. Whether, and to what extent, the reactivity of the test sand affected the test results in the concrete tests was determined from the concrete trials. If the expansion behaviour of a concrete differed from that of the reference mix made with inert limestone crushed sand the appearance of the damage was examined in thin sections under a light-optical microscope. Concrete trials were also carried out with the Portland cement CEM I (st) with an Na₂O equivalent of 0.78 mass % in order to determine the effect of a reduced supply of alkali on the reactivity of the sand. In view of the increasing use of cements containing granulated blastfurnace slag for road construction, supplementary trials were carried out on concretes made with a CEM II/B-S cement that had an Na₂O equivalent of about 0.9 mass %. The compositions of the cements are given in Table 1. The mix compositions of all the concretes conformed to the specifications in Part 3 of the Alkali Guidelines.

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

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

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

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

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Charakterisierung der Prüfsande

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

3 Results

3.1 Characterization of the test sands

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

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

Tafel 2: Petrographie der Sande (Zählergebnisse aus Dünnschliffmikroskopie, Vol.-%)

Table 2: Petrography of the sands (count results from thin-layer microscopy, vol. %)

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

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

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

3.2 Schnellprüfverfahren

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

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

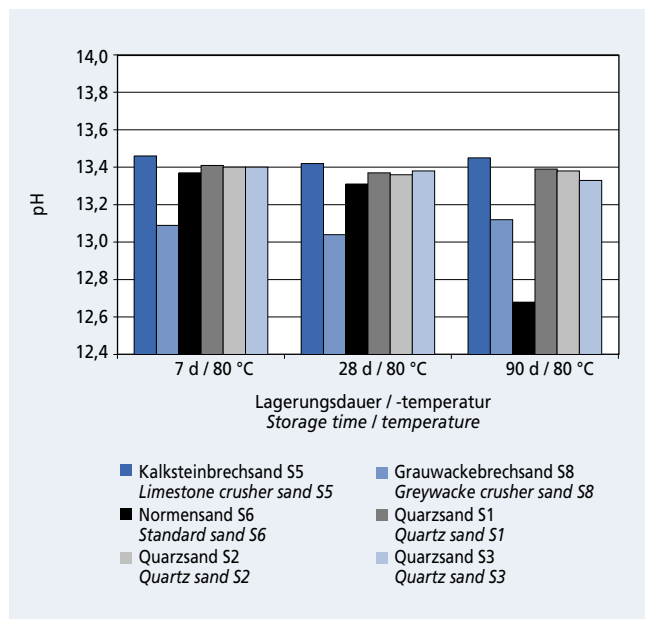


Bild 1: pH-Werte in Porenlösung aus Mörtelprismen mit Prüfzement und verschiedenen Prüfsanden nach unterschiedlich langer Warmlagerung

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

3.2 Accelerated test method

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

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

3.3 Concrete investigations

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

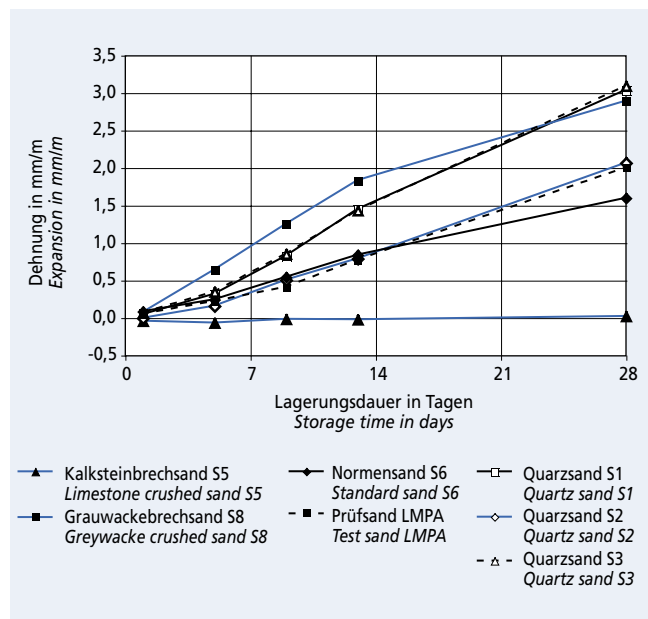


Bild 2: Dehnungen der Mörtelprismen mit Prüfsanden im Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren), Kombinationen mit Prüfzement (CEM I mit Na₂O-Äqu. = 1,2 M.-%)

Figure 2: Expansion of the mortar prisms made with test sands in the accelerated test method (reference method), combinations with test cement (CEM I with Na₂O-equiv. = 1.2 mass %)

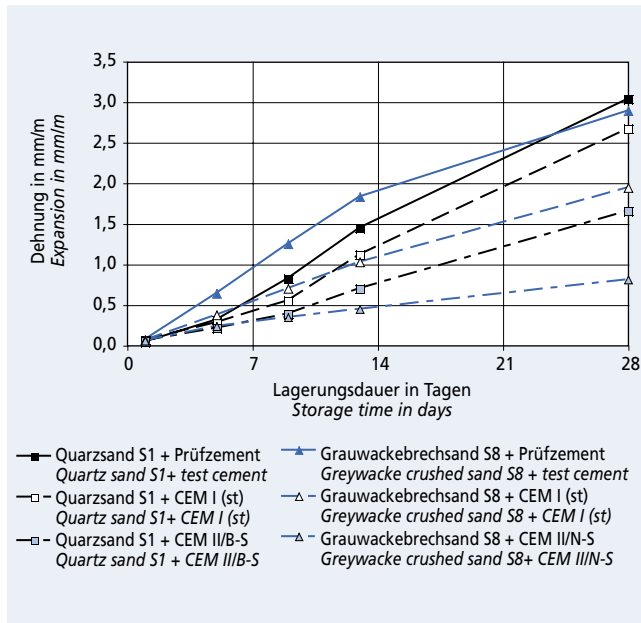


Bild 3: Dehnungen der Mörtelprismen mit den Prüfsanden S1 und S8 im Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren), Kombinationen mit CEM I (st) ($\text{Na}_2\text{O}\text{-Äqu.} = 0,78 \text{ M.-%}$) und CEM II/B-S ($\text{Na}_2\text{O}\text{-Äqu.} = 0,90 \text{ M.-%}$)

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

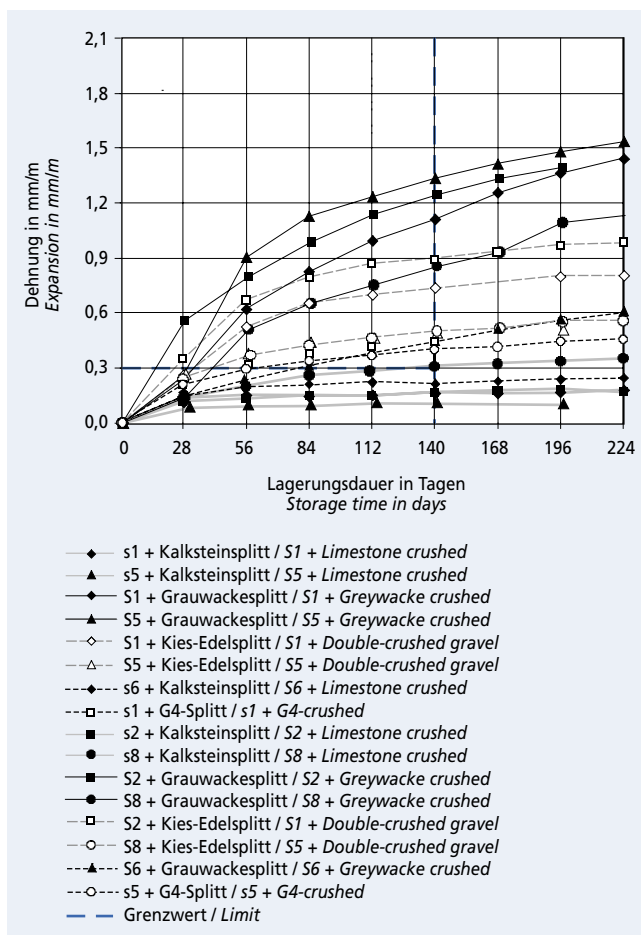


Bild 4: Dehnungen der Betonproben im 60 °C-Betonversuch
Figure 4: Expansion of the concrete samples in the 60 °C concrete test

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

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

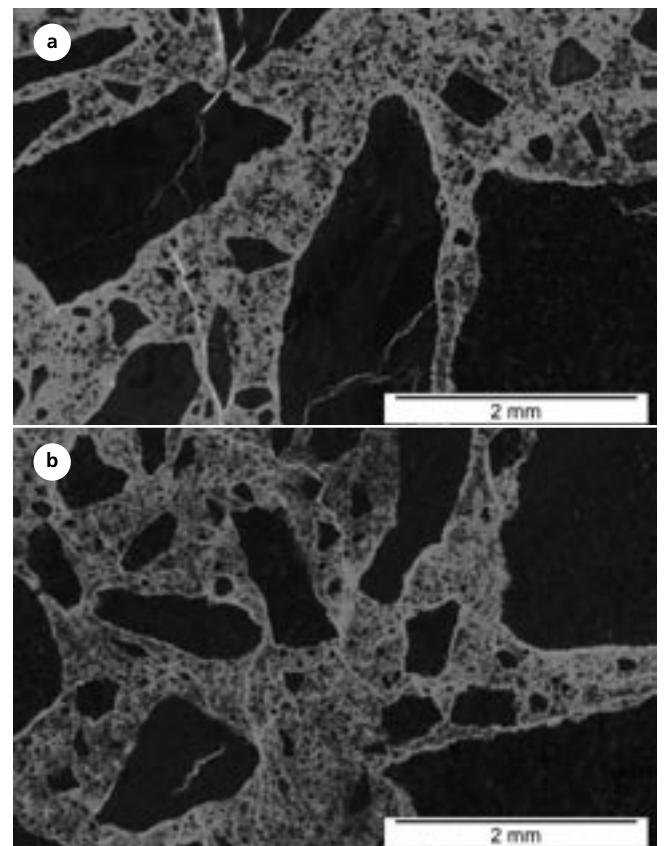


Bild 5: Betone mit Grauwackesplitt nach dem 60 °C-Betonversuch (Dünnschliff unter UV Beleuchtung): oben (5a): mit Kalksteinbrechsand und unten (5b): mit Grauwackebrechsand

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

3.3 Betonuntersuchungen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

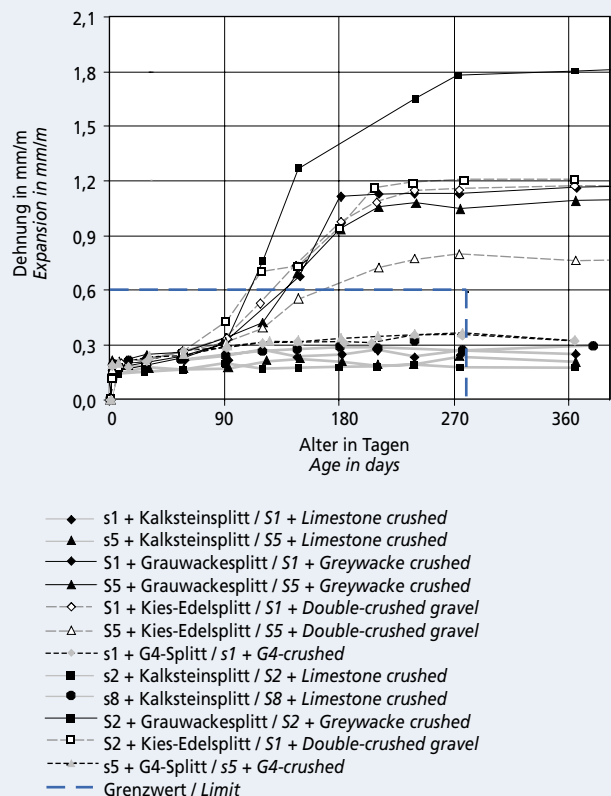


Bild 6: Dehnungen der Betonproben in der Nebelkammer
Figure 6: Expansion of the concrete samples in the fog chamber

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

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

Die Mörtelschnelltests (Alternativverfahren, dargestellt in Bild 7) führten zu einer ähnlich scharfen Trennung in der Beurteilung der inerten und reaktiven groben Gesteinskörnungen wie die Betonversuche. Ein signifikanter Einfluss des Feinkornanteils $< 0,5$ mm von natürlichen quarzitisches Gesteinskörnungen war nicht festzustellen. Da bei diesem Prüfverfahren eine Alkalidotierung des Zementes auf ein Na_2O -Äquivalent von 2,5 M.-% vorgegeben ist und es nur in diesem Fall differenzierbare Ergebnisse liefert, ist es als Performance-Prüfung nicht anwendbar.

4 Zusammenfassung

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

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

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

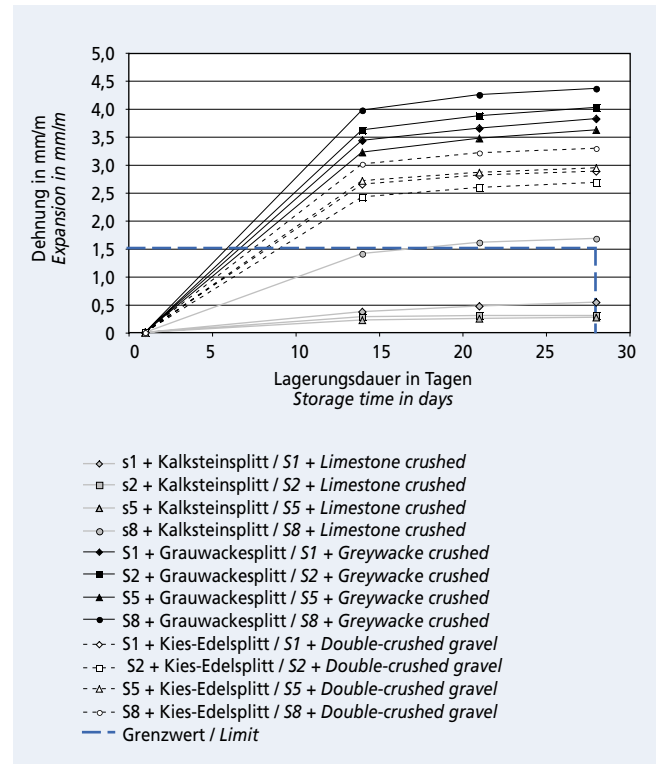


Bild 7: Dehnungen der Proben in Mörtelschnelltests (Alternativverfahren)

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

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

The accelerated mortar test (alternative method, shown in Fig. 7) led to a distinction in the assessment of the inert and reactive coarse aggregates with a sharpness similar to that of the concrete tests. No significant influence of the fine fraction $< 0,5$ mm of the natural quartzitic aggregates could be established. Addition of alkalis to the cement to give an Na_2O equivalent of 2.5 mass % is specified for this test method and it is only in this case that it gives differentiable results so it cannot be applied as a performance test.

4 Summary

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

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

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

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

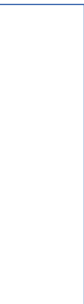
Combinations of test sands with coarse aggregates of defined reactivity and inert coarse aggregates were examined in the concrete tests. The influence of the sand fraction on the expansion values of the concretes was low both in the 60 °C concrete test and in the concrete test with fog chamber storage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

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

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

Literatur / Literature

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



Christoph Müller, Düsseldorf

Aktuelle Regelwerke für Beton

Current regulations for concrete

Übersicht

Die Dauerhaftigkeit ist ein maßgebliches Qualitätsmerkmal von Betonbauteilen und eine wesentliche – auch ökologische – Grundanforderung an Bauwerke. Die technische Weiterentwicklung des Baustoffs bei gleichzeitiger Berücksichtigung umweltpolitischer und wirtschaftlicher Randbedingungen macht Betone heute zu komplexen Systemen verschiedener Betonausgangsstoffe, die sich in verschiedensten Umgebungsbedingungen bewähren müssen. Während das wesentliche Ziel der diesen Prozess begleitenden europäischen Normung die Beseitigung technischer Handelshemmnisse durch die Schaffung einheitlicher Produktnormen ist, definieren die Mitgliedstaaten die ihren klimatischen Bedingungen, ihren Bautraditionen, den rohstoffbedingten Möglichkeiten und ihren Sicherheitsbedürfnissen angemessenen Anwendungsregeln. Die europäische Betonnorm EN 206 mit den diversen nationalen Anwendungsregeln ist – obwohl keine harmonisierte technische Spezifikation im Sinne der Bauproduktenverordnung – ein Beispiel für dieses System. Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird dabei üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung sowie Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sichergestellt. Diese sind entsprechend den jeweiligen konkreten Bauteilbedingungen und bautechnischen Erfordernissen anzuwenden. Die sachgerechte Umsetzung der deskriptiven Anforderungen ist die Aufgabe erfahrener Betoningenieure. Darüber hinaus besteht für besondere Anwendungsbereiche die Möglichkeit, die Dauerhaftigkeit des Betons in Laborprüfungen (Labor-Performance) nachzuweisen oder rechnerisch zu prognostizieren.

1 Einleitung

„Bauprodukte und Bauarten dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes oder aufgrund dieses Gesetzes erfüllen und gebrauchstauglich sind“ [1]. Diese der Musterbauordnung entnommene Formulierung ist seit jeher Grundlage zur Ableitung entsprechender Regelwerke zur Errichtung dauerhafter Bauwerke. Mit der neuen Grundanforderung an Bauwerke Nr. 7 [2] unterstreicht nun auch die Bauproduktenverordnung die Dauerhaftigkeit als wesentliche Grundanforderung an nachhaltige Bauwerke, ohne dass sich daraus unmittelbar zusätzliche Anforderungen an Bauprodukte ergeben müssen [3].

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung (Anforderungen an Ausgangsstoffe, maximaler (äquivalenter) Wasserzementwert, Mindestzementgehalt etc.), Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sowie die sachgerechte Umsetzung ggf. weiterer Erfordernisse aus bautechnischen Randbedingungen (z.B. Gleitbau etc.) sichergestellt. Dieses Prinzip hat sich in weiten Teilen des Bauens mit Beton bewährt und wird auch mit der aktuellen Überarbeitung der europäischen Betonnorm EN 206 nicht aufgegeben. Alternative Nachweise – so genannte leistungsbezogene Entwurfsverfahren – wurden gleichzeitig im Zuge der Vorbereitung der Revision intensiv diskutiert. Auch wenn in der aktuellen Überarbeitung der EN 206 noch keine unmittelbar anwendbaren Regeln hierfür aufgestellt werden, können Labor-Performance-Prüfverfahren heute bereits auf nationaler Ebene zielgerichtet eingesetzt werden. Ein Beispiel ist das

Abstract

Durability is an essential quality feature of concrete components and a basic (as well as ecological) requirement for construction works. The onward technical development of the construction material while at the same time taking environmental policy and economic constraints into account has now turned concrete into a complex system of different concrete constituents that has to prove successful under widely varying ambient conditions. The main aim of the European standardization that accompanies this process is to eliminate technical barriers to trade by creating uniform product standards although the member states define the application rules appropriate to their climatic conditions, their building traditions, the available raw materials and their safety requirements. Although it is not a harmonized technical specification acc. to the Construction Products Regulation the European concrete standard EN 206 with the diverse national application documents is an example of this system. The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition and requirements for the concrete cover and the curing. These have to be applied in accordance with the exposure conditions and the structural requirements. Correct implementation of the descriptive requirements is the task of experienced concrete engineers. In addition to this there is the option for special applications of demonstrating the durability of the concrete in laboratory tests (laboratory performance) or predicting it by service life design.

1 Introduction

“Construction products and types of construction may only be used if, during their use, the structures fulfil the requirements of this law or based on this law and are fit for purpose with adequate maintenance during a time period appropriate to the objective” [1]. This formulation taken from the Model Building Regulation has for a long time been the basis for drawing up the appropriate regulations for constructing durable structures. With the new Basic Requirement for construction works No. 7 [2] the Construction Product Regulation now also emphasizes durability as an essential basic requirement for sustainable construction works without necessarily giving rise directly to additional requirements for construction products [3].

The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition (requirements for constituents, maximum (equivalent) water/cement ratio, minimum cement content, etc.), requirements for the concrete cover and the curing, and correct implementation of other possible requirements from structural engineering conditions (e.g. slipform construction). This principle has proved successful in wide areas of construction with concrete and will not be abandoned in the current revision of the EN 206. During the preparation of the revision there has also been intensive discussion of alternative methods of proof – so-called performance-related design methods. Even though no directly applicable rules will be drawn up for this in the current revision of EN 206 laboratory performance test methods can already be used constructively at the national level. One example of this is the concept of equivalent concrete performance practiced in the Netherlands. In Germany, proof of the durability of concrete based on laboratory tests is used in, for example, the course of technical approvals (abZ-AZ) for cements or in ASR performance tests. The course of damage of the concrete by an alkali-silica reaction (ASR)

in den Niederlanden praktizierte Konzept der gleichen Betonleistungsfähigkeit. In Deutschland werden Nachweise der Dauerhaftigkeit von Beton anhand von Labor-Prüfungen z.B. im Zuge allgemeiner bauaufsichtlicher Anwendungszulassungen (abZ-AZ) für Zemente oder bei AKR-Performance-Prüfungen eingesetzt. In der AKR-Performance-Prüfung an Betonen für den Bau von Fahrbahndecken oder Flugbetriebsflächen wird der Schädigungsverlauf des Betons durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) überprüft. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die Gebrauchstauglichkeit der Betonfahrbahndecke/Flugbetriebsfläche bzw. die Verkehrssicherheit seiner Nutzer nicht durch eine AKR gefährdet wird.

2 Revision der EN 206-1

2.1 Allgemeines

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Beitrags im Frühjahr 2012 befindet sich der Entwurf der EN 206 im so genannten CEN-Enquiry. Im Rahmen dieser Umfrage sind die CEN-Mitgliedsstaaten aufgefordert anzugeben, ob der Normentwurf in der späteren Abstimmung (Formal vote) für sie zustimmungsfähig wäre bzw. was für die Zustimmung des betreffenden Landes verändert werden müsste. Daher wird hier aus einer Reihe bisher nicht veröffentlichter CEN-Dokumente zitiert werden müssen und folgerichtig kann noch nicht über die endgültige Fassung der Norm berichtet werden. Einige grundlegende Punkte, die mit großer Wahrscheinlichkeit Eingang in die Norm finden werden, werden nachfolgend beispielhaft erläutert. Basis sind u.a. das Dokument [4], d.h. der sich im Enquiry befindende Normentwurf. In die Norm integriert werden soll gemäß vorliegendem Entwurf der bisherige Teil 9 (Selbstverdichtender Beton), sodass die zusätzliche Ziffer „1“ in der Bezeichnung der EN 206 entfallen wird. Neu aufgenommen wurden u.a. eine Tabelle zu Grundanforderungen an die Gesteinskörnung und ein Verweis auf den technischen Bericht zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Weiterhin findet eine Überarbeitung und Ergänzung der Anhänge statt. Beispielhaft seien hier genannt die Anhänge D (Zusätzliche Anforderungen an Beton für besondere Aufgaben des Grundbaus), E (Verwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung), F (Grenzwerte der Betonzusammensetzung), G (Selbstverdichtender Beton), H (Anwendung der Methode C, „control charts“) und J (Spanische Sonderregelung für den Konformitätsnachweis).

2.2 Verwendung von Zementen

Im Abschnitt 5.1.2 der EN 206 wird die generelle Eignung von Zementen nach EN 197-1 (Normalzemente) zur Herstellung von Beton nach EN 206 festgestellt. Darüber hinaus können je nach Anwendungsanforderungen (z.B. Expositionsklasse, Bauteilabmessungen) auch die Zemente der EN 14216 (Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme) und der EN 15743 (Sulfathüttenzement) verwendet werden. EN 206 enthält keine weitergehenden konkreten, normativen Festlegungen zur Anwendung einzelner Zementarten. Gemäß 5.2.2 „Wahl des Zements“ muss der Zement „aus den Zementen ausgewählt werden, deren allgemeine Eignung nachgewiesen wurde, wobei Folgendes zu berücksichtigen ist:

- Ausführung der Arbeiten
- Endverwendung des Betons
- Nachbehandlungsbedingungen (z.B. Wärmebehandlung)
- Maße des Bauwerks (Wärmeentwicklung)
- Umgebungsbedingungen, denen das Bauwerk ausgesetzt wird
- mögliche Reaktivität der Gesteinskörnung gegenüber den Alkalien der Ausgangsstoffe.

Die im informativen Anhang F enthaltenen Empfehlungen für die Betonzusammensetzung werden nun voraussichtlich für CEM I und CEM II gelten. Damit würde zumindest ein Teil der bereits seit vielen Jahren mit den normativen Tabellen F.3.1 bis F.3.4 in Deutschland gelebten Praxis der Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen – zum Teil sogar über die derzeit gültigen deutschen Regelungen hinaus – in Form einer Empfehlung auf europäischer Ebene – umgesetzt. Konkret werden mit der Überarbeitung der EN 206 und der dann notwendigen Anglei-

chung in der ASR-Performance-Prüfung auf Betonen für den Bau von Fahrbahndecken oder Flugbetriebsflächen. Dies ist intended to ensure that the fitness for use of the concrete roads or airfields and the safety of the traffic users is not put at risk by an ASR.

2 Revision of EN 206-1

2.1 General

At the time of publication of this contribution in early 2012 the draft of EN 206 was at the CEN enquiry stage. The CEN member countries are required in this survey to indicate whether they would be in agreement with the draft standard in the subsequent formal vote or what would have to be changed to achieve the agreement of the particular country. As a result it is necessary to quote a number of CEN documents that have not yet been published, so it is not yet possible to give a report on the final version of the standard. Some fundamental points that will very probably be included in the standard are explained below by way of example. They are based on, among others, the document [4], i.e. the draft standard used in the enquiry. According to the present draft the former Part 9 (Self-compacting concrete) is to be integrated into the standard with the result that the additional digit “1” in the designation of EN 206 will be omitted. A table of the basic requirements for the aggregate and a reference to the technical report on avoiding harmful alkali-silica reactions have, among others, been newly included. The appendices are also being revised and enlarged. These include Appendices D (Additional requirements for concrete for special geotechnical works), E (Use of coarse recycled aggregate), F (Limits of the concrete composition), G (Self compacting concrete), H (Application of method C, “control charts”) and J (Special Spanish regulation for proof of conformity).

2.2 Use of cements

The general suitability of cements complying with EN 197-1 (normal cements) for producing concrete complying with EN 206 is established in Section 5.1.2 of EN 206. Depending on the application (e.g. exposure class, component dimensions) it is also possible to use cements complying with EN 14216 (Special cement with very low heat of hydration) and EN 15743 (Supersulfated cement). EN 206 does not contain any advanced specific normative definitions about the use of individual types of cement. According to 5.2.2 “Selection of cement” the cement must be selected from those cements that have been shown to be generally suitable, for which the following must be taken into account:

- execution of the work
- intended use of concrete
- curing conditions (e.g. heat treatment)
- dimensions of the structure (the heat development)
- environmental conditions to which the structure is to be exposed
- potential reactivity of the aggregate to the alkalis from the constituents.

The recommendations for the concrete composition contained in the informative Appendix F will now presumably apply to CEM I and CEM II cements. This would implement at least part of the practice already employed for many years in Germany with the normative tables F.3.1 to F.3.4 of using cements with several main constituents – sometimes even beyond the currently valid German regulations – in the form of a recommendation at the European level. With the revision of EN 206 and the adjustment of DIN 1045-2 that will then be necessary the areas of application for cements will also in future be laid down precisely at the national level in Appendix F of DIN 1045-2.

2.3 Use of concrete additions

In the CEN member countries additions are used in concrete within the framework of different principles or concepts. Working group (TG) 5 of the CEN/TC 104/SC1 has summarized the principles and concepts in a report that will be published as a CEN Technical Report (CEN/TR) [7]. A precondition for application of the principles and concepts is conformity of the concrete addition

Tafel 1: Vorschlag für das k-Wert-Konzept der EN 206 gemäß [4]

Table 1: Proposal for the k-value concept for EN 206 in accordance with [4]

Betonzusatzstoff Concrete addition	Zulässige Zementarten nach EN 197-1 (z) / Permissible types of cement acc. to EN 197-1 (c)	k-Wert k-value	Zusatzmenge, die auf $(w/z)_{eq}$ angerechnet werden darf Amount of addition that can be counted towards the $(w/c)_{eq}$
Flugasche (f) nach EN 450-1 fly ash (f) acc. to EN 450-1	CEM I	0,4 ¹⁾	$f/z \leq 0,33$
	CEM II/A		$f/z \leq 0,25$
Silikastaub (s) nach EN 13263-1 silica fume (s) acc. to EN 13263-1	CEM I und / and CEM II/A (ohne / without CEM II/A-D)	2,0 ¹⁾ für $(w/z)_{eq} \leq 0,45$ 2,0 ¹⁾ für $(w/z)_{eq} > 0,45$, außer für XC und XF, in denen $k_s = 1,0$ gilt 2,0 ¹⁾ for $(w/c)_{eq} \leq 0,45$ 2,0 ¹⁾ for $(w/c)_{eq} > 0,45$ except for XC and XF where $k_s = 1,0$	$s/z \leq 0,11$
Hüttensandmehl (h) nach EN 15167-1 blastfurnace slag meal (h) acc. to EN 15167-1	CEM I und/ and CEM II/A	0,6 ²⁾	$h/z \leq 1,0$

¹⁾ normativ / normative²⁾ empfohlener Wert / recommended value

chung der DIN 1045-2 auch zukünftig die Anwendungsbereiche für Zemente national im Anhang F der DIN 1045-2 festgelegt.

2.3 Verwendung von Betonzusatzstoffen

Die Verwendung von Betonzusatzstoffen im Beton erfolgt in den CEN-Mitgliedsstaaten im Rahmen unterschiedlicher Prinzipien bzw. Konzepte. Die Arbeitsgruppe (TG) 5 des CEN/TC 104/SC1 hat die Prinzipien und Konzepte in einem Bericht zusammengestellt, der als CEN Technical Report (CEN/TR) [7] veröffentlicht wird. Voraussetzung zur Anwendung der Prinzipien und Konzepte ist die Konformität des Betonzusatzstoffs mit einer der in Tafel 1 aufgeführten europäisch harmonisierten Stoffnormen.

2.3.1 k-Wert-Konzept

Das k-Wert-Konzept ermöglicht als deskriptive Regelung – d.h. ohne weitere Prüfungen neben dem Konformitätsnachweis des Betons – die Anrechnung eines festgelegten Zusatzstoffgehalts auf den (äquivalenten) Wasserzementwert bzw. den Mindestzementgehalt.

Der vorliegende Entwurf der EN 206 sieht die in Tafel 1 angegebenen k-Werte zur Verwendung mit CEM I und CEM II/A vor.

2.3.2 Prinzip „Beton gleicher Leistungsfähigkeit“

In Abschnitt 5.2.5.3 der EN 206 werden aller Voraussicht nach die Prinzipien des „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) eingeführt. Dieses Konzept ermöglicht definierte Abweichungen von den national festgelegten deskriptiven Anforderungen an den maximalen Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt bei gemeinsamer Verwendung eines Zements und eines Zusatzstoffs, deren Herkunft und Eigenschaften eindeutig beschrieben sind. Der Nachweis der vergleichbaren Leistungsfähigkeit erfolgt anhand von Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton mit der entsprechenden Materialkombination im Vergleich zu einem Referenzbeton für die entsprechende(n) Expositionsklasse(n). In den Niederlanden z.B. wurden Ablauf, Kriterien und Prüfverfahren des ECPC in der nationalen Leitlinie CUR-Empfehlung 48 [5] festgelegt. Das ECPC wird in den Niederlanden seit etwa 15 Jahren für die Verwendung von Flugasche und Zement (CEM I oder einer parallelen Verwendung von CEM I und CEM III) und seit etwa zehn Jahren für Hüttensandmehl und Zement verwendet. Die Verfahren und Anforderungen zur Anwendung von Flugasche bzw. von Hüttensandmehl und Flugasche werden in der niederländischen Beurteilungsrichtlinie für die Zertifizierung BRL 1802 [6] beschrieben [7].

to one of the product standards harmonized at the European level and listed in Table 1.

2.3.1 k-value concept

As a descriptive regulation – i.e. without further tests other than proof of conformity of the concrete – the k-value concept allows a stated addition content to be counted towards the (equivalent) water/cement ratio or minimum cement content.

The present draft of EN 206 provides for k values given in Table 1 to be used with CEM I and CEM II/A cements.

2.3.2 Principle of “equivalent concrete performance”

In all probability the principles of the “equivalent concrete performance concept” (ECPC) will be included in Section 5.2.5.3 of EN 206. This concept permits specific deviations from the descriptive requirements specified at the national level for the maximum water/cement ratio and the minimum cement content during joint use of a cement and an addition with clearly defined origin and properties. The proof of equivalent performance is obtained with the aid of durability tests on concrete with the appropriate material combination compared with a reference concrete for the corresponding exposure class(es). In the Netherlands, for example, the procedures, criteria and test methods for the ECPC are laid down in the national guideline CUR Recommendation 48 [5]. The ECPC has been used for about fifteen years in the Netherlands for the use of fly ash and cement (CEM I or a parallel use of CEM I and CEM III) and for about ten years for ground granulated blastfurnace slag and cement. The methods and requirements for using fly ash or ground granulated blastfurnace slag and fly ash are described [7] in the Netherlands assessment guidelines for the BRL 1802 certification [6].

2.3.3 Principle of “Equivalent performance of cement/addition combinations”

The “Equivalent performance of combinations concept” (EPCC) lays down a procedure with which the basic requirements are established for using a combination of a certain cement (as a rule CEM I Portland cement) and a certain addition in the same way as a type of cement of comparable composition conforming to EN 197-1. In Great Britain and Ireland the concept includes compressive strength tests on mortars as defined in EN 196-1. In Portugal, however, the amount of the combination of a cement and addition that corresponds to a cement type conforming to EN 197-1, is determined mathematically for the combination. The respective application rules stipulated at the national level for this cement

2.3.3 Prinzip „Kombinationen Zement/Zusatzstoff gleicher Leistungsfähigkeit“

Im „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) wird ein Prozedere festgelegt, mit dem die Voraussetzungen geschaffen werden, eine Kombination eines bestimmten Zements (in der Regel Portlandzement CEM I) und eines bestimmten Zusatzstoffs so zu verwenden, wie eine vergleichbar zusammengesetzte Zementart nach EN 197-1. In Großbritannien und Irland beinhaltet das Konzept Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln nach EN 196-1, während in Portugal für die Kombination rechnerisch festgestellt wird, welcher Anteil der Kombination aus Zement und Zusatzstoff einer Zementart nach EN 197-1 entspricht, dessen jeweilige national festgelegte Anwendungsregel dann herangezogen wird. Damit unterscheidet sich das „equivalent performance of combinations concept“ (EPCC) grundlegend von dem „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) dadurch, dass der Nachweis der Dauerhaftigkeit nicht durch Dauerhaftigkeitsprüfungen im konkreten Fall erbracht wird, sondern seine Begründung in den Praxiserfahrungen der Länder hat, in denen es im Rahmen der entsprechenden nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis verwendet wurde.

2.4 Verwendung von Gesteinskörnungen

Der aktuelle Normentwurf [4] enthält, ähnlich wie im deutschen DIN-Fachbericht 100 „Beton“, im Anhang U eine Tabelle mit „Mindestanforderungen“ an die Gesteinskörnungen, die als „generell geeignet“ für Beton nach EN 206 angesehen werden. Insbesondere die Vorschläge zu den Mindestanforderungen an die Kornform „ FI_{40} “ und an die Kornfestigkeit LA_{50} (prEN 206, Tabelle 15) dürften noch zu diskutieren sein. Kommentare hierzu liegen aus einigen Ländern (u.a. Deutschland) und vom Europäischen Transportbetonverband ERMCO vor. Grundsätzlich besteht aber Einvernehmen im CEN/TC 104/SC1, dass „Mindestanforderungen“ notwendig sind, da die europäische Gesteinskörnungsnorm im Zuge ihrer Weiterentwicklung mittlerweile Gesteinskörnungen zulässt, deren generelle Eignung zur Herstellung von Beton nach EN 206 bisher nicht nachgewiesen ist bzw. im CEN/TC 104/SC1 angezweifelt wurde. Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 19 soll des Weiteren Mindestanforderungen an leichte Gesteinskörnungen nach EN 13055 erarbeiten.

2.5 Konformitätsnachweis

Die zuständige Arbeitsgruppe (TG) 10 hatte ihre Arbeit mit der Maßgabe aufgenommen, dass sich die Regeln für die Werkseigene Produktionskontrolle und den Konformitätsnachweis von Beton in der EN 206-1 vom Grundsatz her bewährt haben und es daher keine Notwendigkeit gibt, das System grundlegend zu verändern. Die folgenden Aspekte hat sich TG10 dennoch noch einmal genauer angesehen [8]:

- Mögliche Aufnahme einer Definition „Produktionstag“ und „Produktionswoche“
- Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum
- Verwendung von Kontrollkarten als Alternative zum „klassischen“ Konformitätsnachweis
- Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit
- Konformitätskriterien und werkseigene Produktionskontrolle für den Fasergehalt.

Der aktuelle Normentwurf [4] enthält u.a. die in Tafel 2 aufgeführten Vorschläge mit Bezug auf die zuvor genannten Aspekte.

Erwähnenswert ist weiterhin der neue informative Anhang J der EN 206, der es Spanien erlaubt, bei Methode B einen größeren Koeffizienten als 1,48 für den Konformitätsnachweis der Betondruckfestigkeit festzuschreiben. Konkret verwendet Spanien weiterhin den früher auch in Deutschland vorgeschriebenen Wert von 1,64. Der Grund dafür ist, dass gemäß einer notifizierten spanischen Regel das Abnehmerrisiko niemals mehr als 50 % betragen darf.

type are then applied. The “Equivalent performance of combinations concept” (EPCC) differs fundamentally from the “Equivalent concrete performance concept” (ECPC) in that the proof of durability is not provided in the specific case by durability testing but is based on the practical experience of the country in which it was used within the framework of the corresponding national application rules (concrete composition, concrete cover and curing) and under the corresponding climatic conditions, building traditions and safety requirements.

2.4 Use of aggregates

In a similar way to the German DIN Technical Report 100 “Concrete”, Appendix U of the current draft standard [4] contains a table of “minimum requirements” for the aggregates that are regarded as “generally suitable” for concrete conforming to EN 206. In particular, the proposals for the minimum requirements for the particle shape “ FI_{40} ” and for the particle strength “ LA_{50} ” (prEN 206, Table 15) still need to be discussed. There are comments on this from some countries (including Germany) and from ERMCO, the European Ready-mixed Concrete Organization. Basically, however, there is agreement in the CEN/TC 104/SC1 technical committee that “minimum requirements” are necessary because in the course of its onward development the European aggregates standard now permits aggregates with a general suitability for producing concrete conforming to EN 206 that has not yet been proved or about which the CEN/TC 104/SC1 has doubts. The relevant working group (TG) 19 is also to draw up minimum requirements for light-weight aggregates conforming to EN 13055.

2.5 Conformity control

The relevant working group (TG) 10 had started its work with the stipulation that the rules for factory production control and the conformity control of concrete in EN 206-1 have in principle proved successful and that there is therefore no need to make any fundamental changes to the system. In spite of this the TG10 has looked more closely again at the following aspects [8]:

- possible adoption of definitions for “production day” and “production week”
- number of test results and evaluation period
- use of control charts as an alternative to the “classical” conformity control
- conformity control and identity testing for parameters other than compressive strength
- conformity criteria and factory production controls for fibre content.

The current draft standard [4] contains, among other things, the recommendations listed in Table 2 with respect to the above-mentioned aspects.

Also worth mentioning is the new informative Appendix J of EN 206 that allows Spain to stipulate coefficients greater than 1.48 for the conformity control of the concrete compressive strength in Method B. In practice, Spain continues to use the value of 1.64 that earlier was also stipulated in Germany. The reason for this is that according to a notified Spanish rule the consumer’s risk must never be greater than 50 %.

3 Performance-related design methods (laboratory performance) using the example of the alkali-silica reaction (ASR)

The durability of concrete structures is normally ensured by descriptive rules for the concrete composition (requirements for constituents, maximum (equivalent) water/cement ratio, minimum cement content, etc.) and requirements for the concrete cover and curing. The performance of the concrete for new structures is therefore obtained from facts established from practical experience with existing structures.

The following three reasons, among others, can make it necessary to deviate from this procedure and prove the performance of the concrete and its potential in durability tests in the laboratory:

- a minimum service life >> 50 years has to be proved

Tafel 2: Änderungsvorschläge zum Thema „Konformitätsnachweis“ [4, 8]
 Table 2: Proposed alterations to the topic of “conformity control” [4, 8]

Produktionstag <i>Production day</i>	Die Definition „Produktionstag“ wird nicht aufgenommen. Es konnte keine Einigkeit auf europäischer Ebene erzielt werden. Die Festlegung erfolgt wie bisher national. <i>The definition “production day” will not be included. No unanimity was obtained at the European level. The definition will be at the national level as before.</i>
Produktionswoche <i>Production week</i>	Der Begriff „Produktionswoche“ wurde ersetzt durch eine bestimmte Anzahl von Produktionstagen <i>The term “production week” has been replaced by a given number of production days</i>
Anzahl der Prüfergebnisse und Bewertungszeitraum <i>Number of test results and evaluation period</i>	EN 206-1 enthält bisher keine Begrenzung der Anzahl der Prüfergebnisse. Durch diese Unschärfe verwendet der Betonhersteller ggf. eine Standardabweichung, die nicht repräsentativ für den Nachweiszeitraum ist. <i>EN 206-1 had previously contained no limit to the number of test results. Due to this vagueness the concrete producers have sometimes used standard deviations that are not representative of the proof period.</i> Vorschlag für Werke mit geringer Prüfdichte / <i>Recommendation for plants with low testing frequency:</i> Anzahl Prüfergebnisse in drei Monaten ≤ 35 / <i>number of test results in three months ≤ 35:</i> Nachweis mit $15 \leq n \leq 35$ in höchstens zwölf Monaten / <i>proof with $15 \leq n \leq 35$ in twelve months at most</i> Vorschlag für Werke mit hoher Prüfdichte / <i>Recommendation for plants with high testing frequency:</i> Anzahl Prüfergebnisse in drei Monaten > 35 / <i>number of test results in three months > 35:</i> Nachweiszeitraum höchstens drei Monate / <i>proof period three months at most</i>
Einführung Methode C: Kontrollkarten <i>Introduction of Method C: control charts</i>	Es wird vorgeschlagen, neben den „klassischen“ Methoden des Konformitätsnachweises für die „Erstherstellung“ (Methode A) und die „Stetige Herstellung“ (Methode B) als Methode C das System sogenannter „Kontrollkarten“ in die Norm zu integrieren. Die Methode C kombiniert den Konformitätsnachweis im klassischen Sinne mit einem Instrument der werkseigenen Produktionskontrolle [9]. Sie darf nur verwendet werden, wenn die Betonherstellung einer Fremdüberwachung unterliegt oder die Anwendung der Methode ausdrücklich zwischen dem Verfasser der Festlegung und dem Betonhersteller vereinbart wurde. Für das einzuführende System muss nachgewiesen werden, dass der sogenannte Durchschlupf (average outgoing quality limit (AOQL)) nicht größer als 5,0 % ist. Diese Bedingung gilt als erfüllt, wenn die Vorgaben und Anforderungen des neu eingeführten Anhangs H eingehalten werden. <i>It is recommended that the system of “control charts” should be integrated into the standard as Method C alongside the “classical” methods of conformity control for the “initial production” (Method A) and for “continuous production” (Method B). Method C combines the proof of conformity in the classical sense with an instrument of factory production control [9]. It may only be used if the concrete production is subject to third-party inspection or the application of the method has been expressly agreed between the specifier and the concrete producer. For the system that is to be introduced it must be proved that the average outgoing quality limit (AOQL) is not greater than 5.0 %. This condition is considered to be fulfilled if the targets and requirements of the newly introduced Appendix H are met.</i>
Konformitätsnachweis und Identitätsprüfung für andere Parameter als die Druckfestigkeit <i>Conformity control and identity testing for parameters other than compressive strength</i>	Für die Konsistenz einschließlich des selbstverdichtenden Betons, den Luftgehalt und den Nachweis von Fasergehalt/-verteilung werden Konformitätskriterien bzw. Kriterien für die Abnahmeprüfung auf Basis von Einzelwerten in Form von Grenzwertabweichungen, bezogen auf den festgelegten Wert bzw. die Klasse am Ort der Übergabe, vorgeschlagen (Tabelle 23 und Abschnitte B.4 und B.5) <i>Conformity criteria and criteria for the acceptance test based on individual values in the form of limit deviations, relative to the specified value or class at the point of delivery, are proposed for the consistency, including that of self compacting concrete, the air content and the proof of fibre content/distribution (Table 23 and Sections B.4 and B.5)</i>

3 Leistungsbezogene Entwurfsverfahren (Labor-Performance) am Beispiel Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird üblicherweise durch deskriptive Regeln an die Betonzusammensetzung (Anforderungen an Ausgangsstoffe, maximaler (äquivalenter) Wasserzementwert, Mindestzementgehalt etc.) sowie Anforderungen an die Betondeckung und die Nachbehandlung sichergestellt. Die Leistung (Performance) des Betons für neue Bauwerke ergibt sich somit aus Festlegungen, die aus Erfahrungen mit Bauwerken im Bestand in der Praxis resultieren.

Unter anderen können es die folgenden drei Gründe notwendig machen, von diesem Vorgehen abzuweichen und die Leistung des Betons bzw. sein Potenzial in Dauerhaftigkeitsprüfungen im Labor nachzuweisen:

- Eine Mindestlebensdauer $>> 50$ Jahre ist nachzuweisen
- Neue Baustoffe bzw. Baustoffe ohne Langzeiterfahrung sollen zur Anwendung kommen
- Es liegen besondere Umgebungsbedingungen/Beanspruchungen vor.

Mit Bezug auf die Regelungen zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann zunächst festgestellt werden, dass mit der gültigen Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) einschließlich der 1. Berichtigung (April 2010) und der 2. Berichtigung (April 2011) ein Regelwerk vorliegt, mit dem sichere und praxisgerechte Lösungen für das Bauen mit Beton in allen Anwendungsbereichen des Hoch- und Inge-

- new construction materials or construction materials without long-term experience are to be used
- there are special ambient conditions and/or stresses.

With reference to the regulations for avoiding a harmful alkali-silica reaction (ASR) it should first be noted that with the current Alkali Guidelines issued by the DAfStb (German Committee for Structural Concrete) including the 1st revision (April 2010) and the 2nd revision (April 2011) there are regulations in place with which it is possible to implement safe and practical solutions for construction with concrete in all application areas of building construction and civil engineering (moisture classes WO, WF, WA) using regionally available concrete constituents. However, over the years the guidelines have developed into regulations that are relatively difficult for the user to read. It is currently the task of one of the DAfStb's working groups to make the Alkali Guidelines more “readable” again.

As far as ASRs are concerned the limits of the descriptive system have been reached in two areas of application:

- concrete roads of the SV and I to III construction classes as defined in RStO (Guidelines for the standardization of bearing courses for traffic areas)
- concrete for airfields.

In both areas the concrete is exposed to special ambient conditions or is subject to high stresses: action of de-icing salt/agent with additional high dynamic loads from traffic.

Reconciling research results with practical experience has always been considered as essential for up-dating the Alkali Guidelines. In

nieurbaus (Feuchtigkeitsklassen WO, WF, WA) unter Verwendung regional verfügbarer Betonausgangsstoffe umgesetzt werden können. Die Richtlinie hat sich allerdings über die Jahre zu einem für den Anwender relativ schwer lesbaren Regelwerk entwickelt. Der Aufgabe, die Alkali-Richtlinie wieder besser „lesbar“ zu machen, stellt sich derzeit eine Arbeitsgruppe des DAfStb.

Im Hinblick auf das Thema AKR wurden die Grenzen des deskriptiven Systems in zwei Anwendungsgebieten erreicht:

- Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III nach RStO
- Flugbetriebsflächen aus Beton

In beiden Bereichen unterliegt der Beton besonderen Umgebungsbedingungen bzw. ist hohen Beanspruchungen ausgesetzt: Tausalz-/Taumiteleinwirkung mit zusätzlichen hohen dynamischen Lasten aus Verkehr.

Für die Fortschreibung der Alkali-Richtlinie wurde stets ein Abgleich von Forschungsergebnissen mit praktischen Erfahrungen als notwendig erachtet. Dazu gehörten im Falle von Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion insbesondere nachvollziehbare Angaben über die verwendeten Gesteinskörnungen (Herkunft und Zusammensetzung), die verwendeten Zementarten und Zementmengen sowie der Alkaligehalte in den Betonen. Weiterhin musste geklärt sein, ob unter Einhaltung der zum Zeitpunkt der Schadensfeststellung gültigen Alkali-Richtlinie ein Schaden verhindert worden wäre. Für neu in die Alkali-Richtlinie aufzunehmende Gesteinskörnungen musste ebenso ein an der Praxis evaluiertes Prüfverfahren zur Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse vorhanden sein. Erst wenn diese Fragen beantwortet werden konnten, wurden weitere Maßnahmen in der Alkali-Richtlinie festgeschrieben. Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und soll auch zukünftig erhalten bleiben. Bei Beibehaltung der Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WS (Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III gemäß RStO) in der Alkali-Richtlinie wäre aufgrund von neueren Entwicklungen im Jahr 2008 die Aufnahme weiterer Gesteinskörnungen erforderlich gewesen. Dies hätte eine sofortige Überarbeitung bei gleichzeitiger Klärung aller im vorherigen Absatz beschriebenen offenen Fragen bedeutet [10].

Um für die genannten Bereiche zeitnah praxiserichte Lösungen zur Verfügung zu stellen, wurde an der Bauhaus-Universität Weimar (FIB) und im Forschungsinstitut in Düsseldorf (FIZ) jeweils ein Verfahren entwickelt: Betonversuch mit FIB-Klima-wechselagerung [11] bzw. 60-°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

the instances of damage by an alkali-silica reaction this particularly includes replicable information about the aggregate used (origin and composition), the types and quantities of cement used and the alkali levels in the concretes. It was also necessary to clarify whether damage would have been prevented by compliance with the Alkali Guidelines valid at the time when the damage was detected. A test method that has been evaluated in practice for classification in an alkali-sensitivity class also had to be available for aggregates that were to be newly incorporated in the Alkali Guidelines. Only when these questions had been answered, further measures were specified in the Alkali Guidelines. This procedure has proved successful and will be retained in the future. If the measures for the WS moisture class (concrete roads of the SV and I to III construction classes as defined in the RStO) had been retained in the Alkali Guidelines it would have been necessary to include other aggregates due to recent developments in 2008. This would have meant immediate revision combined with clarification of all the unanswered questions described in the previous paragraph [10].

In order to provide practical solutions promptly for the above-mentioned areas the FIB (Bauhaus University Weimar) and the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) each developed a method: concrete test with FIB cyclic climate storage [11] and 60 °C concrete test with external supply of alkalis [12] respectively. The two methods lead to comparable evaluation of identical concrete technology solutions and are recognized by the BMVBS (Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development) [13].

Figs. 1 to 4 show examples of the results of tests with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % sodium chloride solution (NaCl). Figs. 1 and 2 make it clear that with appropriate reactivity of the aggregate and external supply of alkalis through de-icing salts harmful expansion due to an ASR can be induced even if cements with a low effective alkali content are used. Aggregates that have a sufficiently low sensitivity to alkalis must therefore always be used for concrete roads [15]. Nevertheless, the course of damage in concrete can be influenced to a certain extent by the choice of cement – in this case cements containing granulated blastfurnace slag.

The choice of an aggregate with sufficiently low sensitivity to alkalis is therefore essential for the durability of concrete roads. Fig. 3 shows how the suitability of aggregates for concrete roads can be

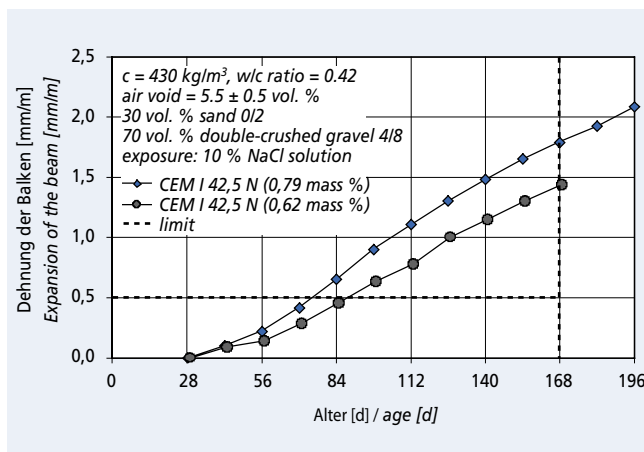


Bild 1: Performance-Prüfung mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Reaktiver Kies-Edelsplitt vom Oberrhein und Portlandzement mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,62 M.-% bzw. 0,79 M.-% [14]

Figure 1: Performance testing with the 60 °C concrete test and external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: reactive double-crushed gravel from the Upper Rhine and Portland cement with an Na_2O equivalent of 0.62 mass % or 0.79 mass % [14]

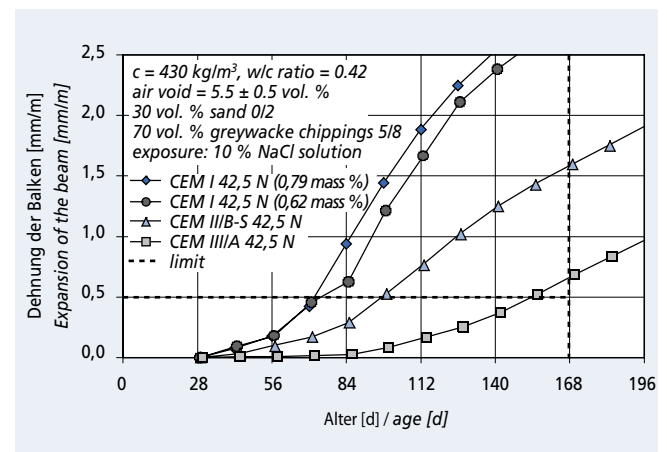


Bild 2: Performance-Prüfung mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Reaktiver Grauwacke-Splitt und verschiedene Fahrbahndeckenzemente (Portlandzement Na_2O -Äqu. = 0,62 M.-% und 0,79 M.-%, CEM II/B-S 42,5 N und CEM III/A 42,5 N; CEM III/A 42,5 N erfüllt auch Anforderungen an NA-Zement) [14]

Figure 2: Performance testing with the 60 °C concrete test and external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: reactive greywacke chippings and various cements for concrete roads (Portland cement Na_2O equivalent = 0.62 mass % or 0.79 mass %, CEM II/B-S 42,5 N cement and CEM III/A 42,5 cement; the CEM III/A 42,5 also fulfils the requirements for low-alkali cement) [14]

von außen [12]. Beide Verfahren führen zu einer vergleichbaren Bewertung identischer betontechnischer Lösungen und sind vom BMVBS anerkannt [13].

Die Bilder 1 bis 4 zeigen beispielhaft Ergebnisse solcher Prüfungen mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige Natriumchlorid-Lösung (NaCl). Die Bilder 1 und 2 verdeutlichen, dass bei entsprechender Reaktivität der Gesteinskörnung und bei einer Alkalizufuhr von außen durch Tausalze auch dann schädliche Dehnungen infolge AKR induziert werden können, wenn Zemente mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt zum Einsatz kommen. Bei Fahrbahndeckenbetonen müssen deshalb immer ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt werden [15]. Gleichwohl kann der Verlauf der Schädigung des Betons in gewissem Umfang durch die Auswahl des Zements – in diesem Fall durch hüttensandhaltige Zemente – beeinflusst werden.

Wesentlich für die Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken ist somit die Auswahl einer ausreichend alkaliunempfindlichen Gesteinskörnung. Bild 3 zeigt, wie mit dem 60-°C-Betonversuch und einer Alkalizufuhr von außen die Eignung von Gesteinskörnungen für Betonfahrbahndecken durch eine WS-Grundprüfung beurteilt werden kann. Verwendet wurde eine „Grenzrezeptur“ für Waschbeton ($z = 430 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,42$) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,80 M.-%).

Im gezeigten Beispiel sind die Gesteinskörnungen mit den Kreis-Symbolen geeignet für den Einsatz in der Feuchtigkeitsklasse WS. Der Einsatz der übrigen Gesteinskörnungen würde aufgrund der Überschreitung des Grenzwerts bzw. aufgrund eines deutlichen Dehnungsanstiegs zum Beurteilungszeitpunkt in Kombination mit nachgewiesenen AKR-Reaktionsprodukten (Dünnschliff) für Waschbeton in der Feuchtigkeitsklasse WS nicht empfohlen werden. Dieser Ansatz einer WS-Grundprüfung zum Nachweis der Eignung von Gesteinskörnungen für die Feuchtigkeitsklasse WS soll Eingang in das zukünftige Regelwerk zum Bau von Fahrbahndecken aus Beton finden.

Hintergrund des Konzepts der WS-Grundprüfung ist einerseits, dass in der aktuellen Praxis die „klassischen“ Gesteinskörnungsuntersuchungen (z.B. petrographische/mineralogische Charakterisierung, Schnelltests (Referenz- und Alternativverfahren) und der 40-°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) allein

assessed by a WS aggregate test using the 60 °C concrete test and external supply of alkalis. A “border mix formulation” for exposed aggregate concrete ($c = 430 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.42$) with Portland cement with an Na_2O equivalent of 0.80 mass % was used.

In the example shown the aggregates with circular symbols are suitable for use in the WS moisture class. Use of the other aggregates for exposed aggregate concrete in the WS moisture class would not be recommended because the limit was exceeded or because of a significant increase in expansion at the time of assessment combined with detected ASR reaction products (thin sections). This approach of using a WS aggregate test to prove the suitability of aggregates for the WS moisture class is to be included in the future regulations for the construction of concrete roads.

The background to the concept of WS aggregate testing is partly that, in current practice, the “classical” aggregate investigations (e.g. petrographic/mineralogical characterization, accelerated tests (reference and alternative methods) and the 40 °C concrete test specified in the Alkali Guidelines, Part 3) are not in themselves sufficient in all cases for reliable assessment of the ASR damage potential of aggregates in concrete compositions for the WS moisture class. An example of this is shown in Fig. 4. Significant expansions were found in the concrete test with external supply of alkalis even though the accelerated test method (reference method) (ATM) had been passed. In doubtful cases it is therefore necessary to carry out an ASR performance test for the specific concrete composition intended for the project. However, this is frequently not feasible within the normal time frame for construction projects because of the long duration of the test. In these doubtful cases the aggregates must currently be replaced by aggregates that expert opinion has already shown to be free from doubt. To avoid such situations in the future it is intended that the fundamental suitability of aggregates should be investigated in advance independently of the actual construction project using a concrete composition specific to the WS moisture class [18].

4 Compressive strength versus durability

The increasing use of other main constituents in cement and therefore the continuous reduction of the content of Portland cement clinker in the cement have led to an improvement in the specific construction material profiles for cement and concrete, especially with respect to their global warming potential. The consistent

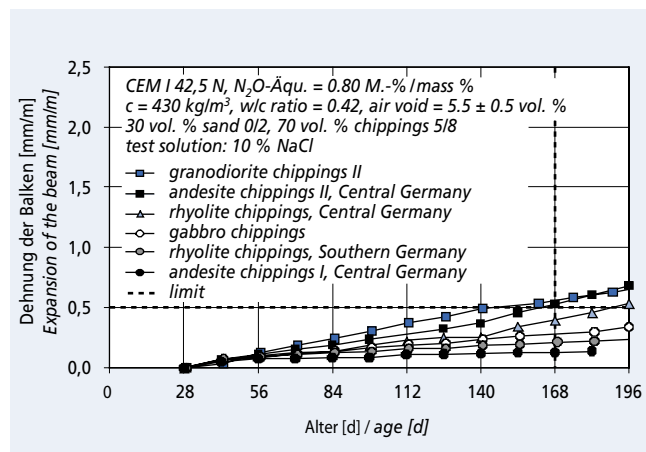


Bild 3: WS-Grundprüfung - Betonzusammensetzung für Oberbeton (0/8) ($z = 430 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,42$) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,80 M.-%) – mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Verschiedene Gesteinskörnungen [16]

Figure 3: Aggregate test for WS moisture class – concrete composition for top course concrete (0/8) ($c = 430 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.42$) with Portland cement with an Na_2O equivalent of 0.80 mass % – with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: various aggregates [16]

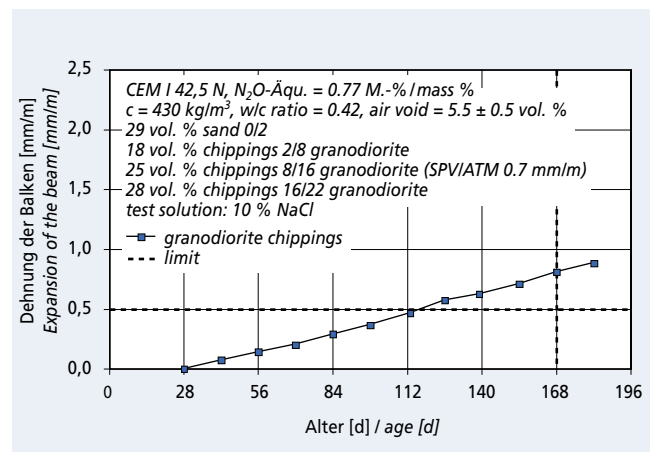


Bild 4: WS-Grundprüfung – Betonzusammensetzung für Oberbeton ($D > 8 \text{ mm}$) und Unterbeton ($z = 360 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,38$) mit Fahrbahndeckenzement (Portlandzement mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,77 M.-%) – mit dem 60-°C-Betonversuch und Alkalizufuhr von außen durch eine 10%ige NaCl-Lösung; Beispiel: Granodiorit, SPV = Schnellprüfverfahren [17]

Figure 4: Aggregate test for WS moisture class – concrete composition for top course concrete ($D > 8$) and base course concrete ($c = 360 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.38$) with Portland cement with an Na_2O equivalent of 0.77 mass % – with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 10 % NaCl solution. Example: granodiorite, ATM = accelerated test method [17]

nicht in allen Fällen ausreichen, um das AKR-Schädigungspotenzial von Gesteinskörnungen in Betonzusammensetzungen für die Feuchtigkeitsklasse WS sicher zu beurteilen. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 4. Trotz bestandener Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) (SPV) zeigen sich in der Betonprüfung mit Alkalizufuhr von außen signifikante Dehnungen. In Zweifelsfällen ist daher für die vorgesehene projektspezifische Betonzusammensetzung die Durchführung einer AKR-Performance-Prüfung erforderlich, die aber aufgrund der langen Prüfdauer häufig nicht innerhalb des praxisüblichen Zeitrahmens für Bauvorhaben durchführbar ist. In diesen Zweifelsfällen müssen derzeit die Gesteinskörnungen gegen solche ausgetauscht werden, deren Eignung gutachterlich bereits zweifelsfrei festgestellt wurde. Um derartige Situationen zukünftig zu vermeiden, ist vorgesehen, die prinzipielle Eignung von Gesteinskörnungen unabhängig vom konkreten Bauvorhaben in einer WS-spezifischen Betonzusammensetzung vorab zu untersuchen (Gesteinskörnungsprüfung für WS = WS-Grundprüfung) [18].

4 Druckfestigkeit gegen Dauerhaftigkeit

Die zunehmende Verwendung weiterer Zementhauptbestandteile und damit die kontinuierliche Reduzierung des Portlandzementklinkergehalts im Zement hat in Deutschland zu einer Verbesserung der spezifischen Baustoffprofile für Zement und Beton insbesondere im Hinblick auf das Treibhauspotenzial geführt. Die konsequente Entwicklung des Inlandsversands zu immer mehr Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen [19] trug zu einer deutlichen Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors bei. Dieser betrug im Jahr 1987 86 % und wurde bis zum Jahr 2009 auf 75 % vermindert [20]. Die Frage, ob sich auf diesem Wege eine weitere deutliche Reduzierung des mittleren Klinker/Zement-Faktors in Deutschland realisieren lässt, hängt einerseits von der Verfügbarkeit von Zementhauptbestandteilen wie z.B. Hüttensand und Flugasche ab. Auf der anderen Seite bestehen aktuell berechtigt Grenzen der Einsatzmöglichkeiten des Kalksteins als Zementhauptbestandteil in Betonen mit den Betonzusammensetzungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2.

Vor diesem Hintergrund beschäftigen sich in der aktuellen Diskussion der Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien beim Bauen mit Beton verschiedene Stellen mit der Reduzierung der Umweltwirkungen in der Herstellung des Baustoffs Beton. Schlussendlich geht es unabhängig vom gewählten Ansatz um eine ökologisch wie ökonomisch effiziente Verwendung des Portlandzementklinkers, mit der zur gleichen Zeit die Qualität der Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons auf hohem Niveau gehalten werden muss. Aus einer im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Auswertung von Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungsergebnissen ging der in Bild 5 dargestellte Zusammenhang zwi-

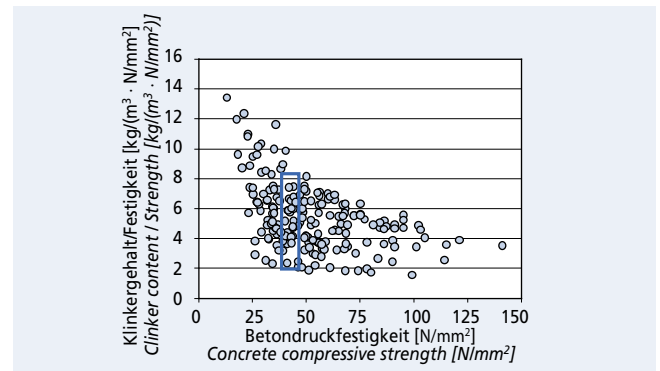


Bild 5: Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt (Klinker = Portlandzementklinker + Sulfat-träger + ggf. Nebenbestandteile) und der Betondruckfestigkeit (Daten aus [13, 21-27]) – markierter Bereich: Betone mit Betondruckfestigkeiten (40 ± 5 N/mm²) [28]

Figure 5: Relationship between the clinker content relative to the concrete compressive strength (clinker = Portland cement clinker + sulfate agent + possible secondary constituents) and the concrete compressive strength itself (data from [13, 21-27]) – marked area: concretes with compressive strengths of 40 ± 5 N/mm² [28]

trend in domestic dispatches towards ever more cements with several main constituents [19] has contributed to a significant reduction in the clinker/cement factor. In 1987 this was 86 % and by 2009 had fallen to 75 % [20]. The question as to whether a further reduction in the average clinker/cement factor can be achieved in Germany in this way depends partly on the availability of cement main constituents such as granulated blastfurnace slag and fly ash. On the other hand, there are at the moment justified limits to the possible use of limestone as a main cement constituent in concretes with concrete compositions complying with DIN EN 206-1/DIN 1045-2.

Against this background various researches are concentrating on reducing the environmental effects in the production of concrete as a building material in the current discussion on the implementation of sustainability principles when building with concrete. Regardless of the chosen approach it is ultimately a matter of ecologically and economically efficient use of the Portland cement clinker that at the same time has to keep the quality of the durability properties of the concrete at a high level. The relationship shown in Fig. 5 between the clinker content relative to the concrete compressive strength and the concrete compressive strength itself was obtained from an evaluation carried out at the Research Institute of the

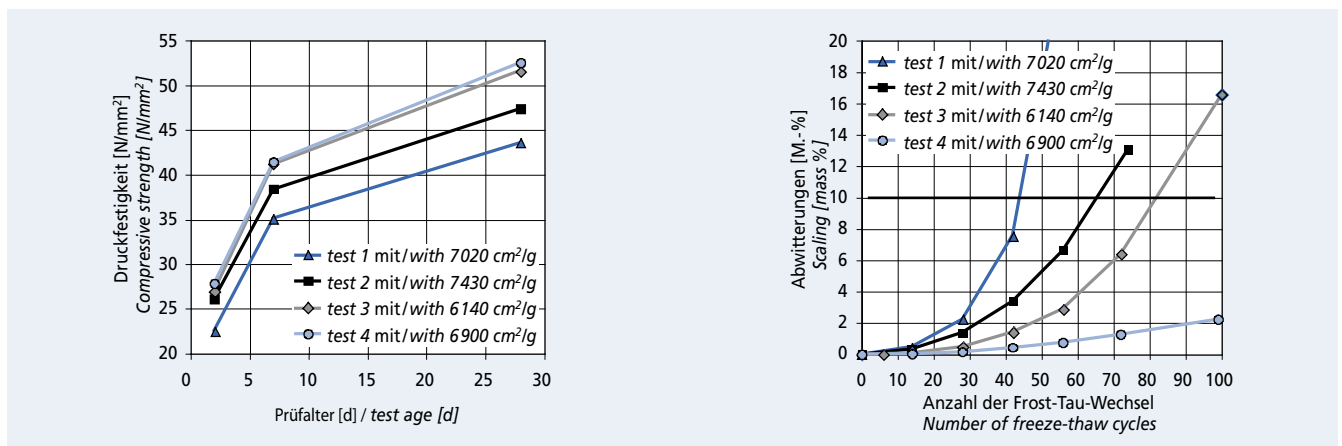


Bild 6: Druckfestigkeitsentwicklung des Zements (links) und Abwitterungen von Betonen ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$) im Würfelverfahren (rechts) mit Portlandkalksteinzementen unterschiedlicher Feinheit mit 30 M.-% Kalkstein [29]

Figure 6: Compressive strength development of the cement (left) and the scaling of concretes ($c = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0.60$) in the cube method (right) with Portland-limestone cements of differing fineness containing 30 mass % limestone [29]

schen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit hervor. Der spezifische, in diesem Fall auf das Leistungsmerkmal Betondruckfestigkeit bezogene Klinkergehalt nimmt mit steigender Druckfestigkeit ab.

Die betontechnischen Gründe für diesen Zusammenhang sind bekannt: Reduzierung des effektiven Wasserzementwerts, Optimierung der Granulometrie der Feinstoffe, Einsatz wirksamer Betonsatzmittel. Analysiert man in dieser Darstellung beispielhaft den Bereich der Druckfestigkeit von $(40 \pm 5) \text{ N/mm}^2$ im Hinblick auf die Zusammensetzung der verwendeten Hauptbestandteile, findet man unter anderem Stoffkombinationen mit relativ geringen Klinkergehalten und sehr hohen Kalksteingehalten.

Kalkstein liegt als Hauptrohstoff des Portlandzementklinkers an jedem Standort eines Zementwerks vor, sodass bei seiner Verwendung als Zementhauptbestandteil Transportkosten sowie mit dem Transport verbundene Emissionen entfallen. Da es sich bei Kalkstein allerdings um ein Inertmaterial handelt, ist eine deutliche Erhöhung seines Anteils im Zement aufgrund der normativ festgelegten Randbedingungen, verbunden mit dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand, nicht ohne Weiteres möglich.

Vor allem ist aber die Verkürzung des Themas auf den Aspekt „Druckfestigkeit (im Labor)“ nicht zielführend. Die Gleichmäßigkeit der Betonausgangsstoffe, die Robustheit des Betons im Baubetrieb und besonders die Dauerhaftigkeit des Betons sind entscheidende Parameter. Bild 6 verdeutlicht am Beispiel der Verwendung von Zementen mit einem Kalksteingehalt von 30 M.-% und des Frostwiderstands von Beton, dass der Zement, seine Hauptbestandteile oder ggf. der Betonzusatzstoff die Dauerhaftigkeit des Betons signifikant beeinflussen kann, ohne dass dies zwingend an der Druckfestigkeit erkennbar wäre (hier: Vergleich der Versuchszemente 3 und 4). Im dargestellten Fall sind es durch die Verfahrenstechnik der Zementherstellung bedingte granulometrische Einflüsse.

Auch im Zuge der vorbereitenden Arbeiten für die Revision der EN 206 wurde die Frage diskutiert, inwiefern die Druckfestigkeit des Zements, der Kombination Zement/Zusatzstoff oder des Betons stellvertretend (engl.: „as a proxy criterion“) eine Aussage über Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässt. Die Frage resultiert aus der gelebten Praxis, im Rahmen deskriptiver Anwendungsregeln (z.B. Anwendung der Zemente nach DIN EN 197-1 gemäß den Tabellen F.3.2 bis F.3.4 in DIN 1045-2 oder der Verwendung von Kombinationen nach British Standard BS 8500-2 gemäß der Anwendungsregeln in BS 8500-1), auf der Basis festigkeitsbezogener Konformitätsnachweise für Zement, Kombination und Beton auf eine konkrete Überprüfung der Dauerhaftigkeit zu verzichten. Dies erscheint in beiden Fällen gerechtfertigt aufgrund der umfangreichen Praxiserfahrungen der betreffenden Länder, mit denen im Rahmen der jeweiligen nationalen Anwendungsregeln (Betonzusammensetzung, Betondeckung und Nachbehandlung) sowie unter den entsprechenden klimatischen Bedingungen, der Bautradition und dem Sicherheitsbedürfnis die Stoffe erfolgreich eingesetzt wurden.

Nicht ohne weitere Überprüfung der Dauerhaftigkeitseigenschaften zulässig ist diese Vorgehensweise bei neuen Stoffen. Auch eine unmittelbare Übertragung der Anwendungsregeln eines Landes auf die Verhältnisse in einem anderen Land verbietet sich aus den zuvor genannten Gründen. Anschaulich darstellen lässt sich dies im Vergleich von Anwendungsregeln für Zemente verschiedener Länder am Beispiel von Außenbauteilbetonen (Tafel 3).

So lässt Italien auf der Basis national verfügbarer und bewährter Rohstoffe in Außenbauteilen die Verwendung einer deutlich größeren Bandbreite von Zementen zu als z.B. Deutschland. Der Vergleich der betontechnischen Randbedingungen zeigt, dass die Voraussetzungen hierfür in Italien ($\max w/z = 0,50$) aber auch andere sind als in Deutschland ($\max w/z = 0,60$).

Ein anderes Beispiel ist die Anwendung hüttensandhaltiger Zemente mit hohem Sulfatwiderstand nach DIN 1164-10 (HS) bzw. EN 197-1 (SR) im Vergleich zu Kombinationen aus Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff und Portlandzement [30]: Im Gegensatz zu den deutschen Erfahrungen mit hüttensandhaltigen Hochofen-

Cement Industry of the results in the literature and the results of in-house investigations. The specific clinker content, in this case relative to the concrete compressive strength, decreases with increasing compressive strength.

The concrete technology reasons for this relationship are well known: reduction of the effective water/cement ratio, optimization of the granulometry of the fines, use of effective concrete admixtures. If, for example, the compressive strength range of $40 \pm 5 \text{ N/mm}^2$ in this diagram is examined with respect to the composition of the main constituents material combinations are found with relatively low levels of clinker and very high levels of limestone.

Limestone is the main raw material for Portland cement clinker so it is available at every cement plant site. This means that transport costs, and the emissions associated with transport, do not apply when limestone is used as a cement main constituent. However, limestone is an inert material so any significant increase in its proportion in cement is not readily possible because of the constraints laid down in the standards coupled with current inadequate level of knowledge.

However, it is not constructive to abbreviate the topic to the aspect of “compressive strength (in the laboratory)”. The uniformity of the concrete constituents, the robustness of the concrete during construction work and, in particular, the durability of the concrete are crucial parameters. Fig. 6 uses the example of the use of cements with a limestone content of 30 mass % and of the freeze-thaw resistance of concrete to show that the cement, its main constituents or possibly the concrete addition can have a significant influence on the durability of the concrete without this necessarily being detectable in the compressive strength (in this case compare test cements 3 and 4). In this instance this is due to the granulometric effects caused by the process technology of the cement production.

The question about the extent to which the compressive strength of the cement, of the cement/addition combination or of the concrete can be used as a proxy criterion to provide information about the durability characteristics was also discussed during the preliminary work for the revision of EN 206. The question arose from the practice of dispensing with a specific check on the durability in the context of descriptive application rules (e.g. use of the cements as specified in DIN EN 197-1 in accordance with Tables F3.2 to F3.4 in DIN 1045-2 or the use of combinations as specified in British Standard BS 8500-2 in accordance with the application rules in BS 8500-1) on the basis of strength-related proof of conformity for cement, combinations and concrete. In both cases this seems justified because of the extensive practical experience of the countries involved with which the materials have been used successfully within the framework of the respective national application rules (concrete composition, concrete cover and curing) as well as under the corresponding climatic conditions, building traditions and safety requirements.

This procedure is not permissible with new materials without further testing of the durability characteristics. Direct transfer of the application rules of one country to the conditions in another country is also out of the question for the above-mentioned reasons. This is vividly illustrated by comparison of the application rules for cements in different countries using the example of exterior component concretes (Table 3).

This shows that on the basis of nationally available and proven raw materials Italy permits the use of a significantly wider range of cements in exterior components than, for example, Germany. However, comparison of the concrete technology conditions shows that the preconditions for this in Italy ($\max. w/c = 0.50$) are also different from those in Germany ($\max. w/c = 0.60$).

Another example is the use of sulfate-resisting cements containing granulated blastfurnace slag as specified in DIN 1164-10 (HS) or EN 197-1 (SR) compared with combinations of ground granulated blastfurnace slag, used as a concrete addition, and Portland cement [30]. In contrast to the German experience with blastfurnace cements containing granulated blastfurnace slag (HS or SR cement with a granulated blastfurnace slag content $\geq 66 \text{ mass } \%$) various investigations from Great Britain and the USA provide evidence

Tafel 3: Vergleich der Anwendungsregeln für Zemente im Rahmen nationaler Anhänge zur europäischen Betonnorm EN 206-1 am Beispiel eines Betons für die Expositionsklasse XF1

Table 3: Comparison of the application rules for cements given in the national appendices to the European concrete standard EN 206-1 based on the example of a concrete for exposure class XF1

Land Country	max (w/z) _{eq} / max. (w/c) _{eq}	min z / min. c [kg/m ³]	CEM I	CEM II						CEM III		CEM IV		CEM V	
				S		LL		M		A	B	A	B	A	B
				A	B	A	B	A	B						
Österreich Austria	0,55	300	X	X	X				(X)	X	(X)				
Belgien Belgium	0,55	300	X	X	X	X	X	X	X	X	X			(X)	
Dänemark Denmark	0,55	150	(X)			(X)									
Finnland Finland	0,60	270	X	X	X	X		X		X	X				
Deutschland Germany	0,60	280	X	X	X	X	○	(X)	(X)	X	X	○	(X)	(X)	(X)
Irland Ireland	0,60	300	X			X									
Italien Italy	0,50	320	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Niederlande Netherlands	0,55	300	X	X	X	(X)	(X)	(X)	(X)	X	X	(X)	(X)	(X)	(X)
Norwegen Norway	0,60	250	X	X		X									
Großbritannien Great Britain	0,60	280	X	X	X	X				X	X	(X)	(X)		
			X	erlaubt permitted			nicht erwähnt not mentioned		(X)	mit Einschränkungen with restrictions		○	nicht erlaubt not permitted		

zementen (HS- bzw. SR-Zement mit einem Hüttensandgehalt ≥ 66 M.-%) belegen verschiedene Untersuchungen aus Großbritannien und den USA, dass die gemeinsame Verwendung von Hüttensandmehl (Anteil > 65 M.-%) und Portlandzement keinesfalls immer einen höheren Sulfatwiderstand des Betons bewirkt als die alleinige Verwendung eines Portlandzements. Als Beispiel werden in [30] Ergebnisse aus Langzeituntersuchungen von D.C. Stark [31] über einen Zeitraum von bis zu 16 Jahren sowohl unter Labor- als auch unter Freilandbedingungen gezeigt. Die Betonprüfkörper wurden einem hohem Sulfatangriff und einem Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklus ausgesetzt. Bild 7 zeigt in graphischer Darstellung das Abwitterungsverhalten von Prüfkörpern auf Basis von Portlandzement bzw. von Gemischen aus Portlandzement und Hüttensandmehl. Die hüttensandmehlhaltigen Prüfkörper zeigten stärkere Abwitterungen als die Prüfkörper auf Basis von Portlandzement (= „ohne HSM“) [31].

5 Schlussfolgerungen

Die technische Weiterentwicklung des Baustoffs bei gleichzeitiger Berücksichtigung umweltpolitischer und wirtschaftlicher Randbedingungen macht Beton heute zu einem komplexen System verschiedener Betonausgangsstoffe, dass sich in verschiedensten Umgebungsbedingungen bewähren muss. Zur gleichen Zeit erschwert die „... im Allgemeinen vorherrschende Fokussierung auf Planungs- und Baukosten ... die Umsetzung langfristiger Ziele und verstellt den Blick auf nachhaltige, den Lebenszyklus von Bauwerken optimierende Lösungen.“ (Zitat aus dem Leitbild Bau (vgl. www.leitbild-bau.de)). In dieser Gemengelage bedarf es einer Regelwerksetzung, die einerseits flexible Randbedingungen für Baustoffhersteller und Bauausführende formuliert und andererseits auf die Bedürfnisse des Bauherrn zugeschnittene sichere und dauerhafte Bauwerke zur Folge hat. Die Autoren des Leitbilds formulieren es so: „Von der Politik erwarten wir, dass sie den Qualitätswettbewerb insbesondere durch die Setzung kompetenz-, nachhaltigkeits- und innovationsorientierter Rahmenbedingungen fördert.“ Begreift man die Langlebigkeit, sprich Dauerhaftigkeit, als eine Grundanforderung an nachhaltige Bauwerke, so kann die Beton-

that the joint use of ground granulated blastfurnace slag (proportion > 65 mass %) and Portland cement does not by any means always produce a higher sulfate resistance of the concrete than the sole use of a Portland cement. Results from long-term investigations by D.C. Stark [31] over a period of up to 16 years under both laboratory and outdoor conditions are shown as an example in [30]. The concrete test pieces were exposed to severe sulfate attack and a wetting-drying cycle. The diagram in Fig. 7 shows the scaling behaviour of test pieces based on Portland cement and on mixtures of Portland cement and ground granulated blastfurnace slag. The

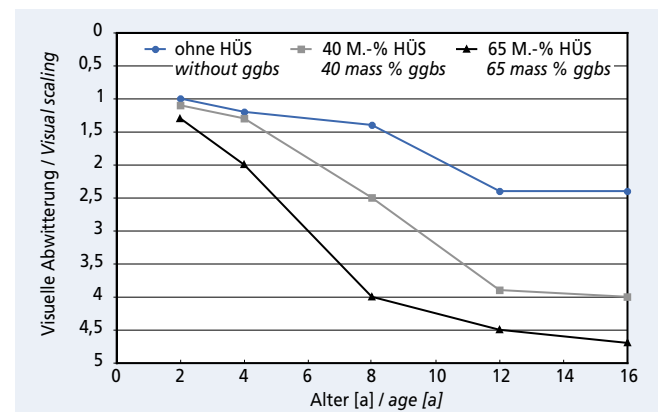


Bild 7: Visuelle Abwitterungsraten von Betonprüfkörpern auf Basis von Portlandzement („ohne HSM“) und Portlandzement/Hüttensandmehl (h) -Gemischen (w/z = 0,37...0,39, (z+h) = 390 kg/m³, Hüttensandmehlanteil 40 M.-% bzw. 65 M.-%), Sulfatkonzentration der Lagerlösung 65 000 ppm [30, 31]

Figure 7: Visual scaling rates of concrete test pieces based on Portland cement („without ggbs“) and mixtures of Portland cement and blastfurnace slag meal (h) (w/c = 0.37 ... 0.39 (c+h) = 390 kg/m³, proportion of ground granulated blastfurnace slag 40 mass % or 65 mass %), sulfate concentration of the storage solution 65 000 ppm [30, 31]

bauweise ihre Stärke dann voll ausspielen, wenn wir das Regelwerk und das Handeln aller am Bau Beteiligten auf diese Zielgröße ausrichten. Wir sollten also nicht der Versuchung erliegen, die einfachen Lösungen zu suchen: Druckfestigkeit alleine sichert nicht die Dauerhaftigkeit. Verspielt die Betonbauweise einmal das über Jahrzehnte gewonnene Vertrauen als langlebiger Baustoff, dürfte es ebenso lange dauern, dieses Vertrauen zurückzugewinnen. In diesem Zusammenhang wird man ggf. auch über den einen oder anderen Aspekt der qualitätssichernden Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette noch einmal sprechen müssen. Sucht man nach einer Kurzformel, bietet es sich an, den Satz „Vertrauen ist gut ...“ in der landläufig bekannten Art und Weise zu Ende zu bringen: „... Kontrolle ist besser.“

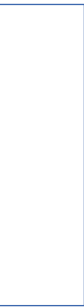
test pieces containing ground granulated blastfurnace slag exhibited more severe scaling than the test pieces based on Portland cement (= “without ggbs”) [31].

5 Conclusions

The technical development of concrete as a construction material while at the same time taking environmental policy and economic constraints into account has now turned concrete into a complex system of different concrete constituents that has to prove successful under widely varying ambient conditions. At the same time the “...generally prevalent concentration on design and construction costs ... [hampers] the implementation of long-term goals and shifts the focus to sustainable solutions that optimize the life cycle of structures.” (Quotation from the Mission Statement for Construction (c.f. www.leitbild-bau.de)). In this conflicting situation there is a need for regulations that not only formulate flexible boundary conditions for the producers of construction materials and for the contractors but also result in safe and durable structures tailored to the needs of the client. The authors of the mission statement formulate it in this way: “we expect the policies to promote quality competition, in particular by setting boundary conditions based on competence, sustainability and innovation”. If longevity, i.e. durability, is taken as a basic requirement for sustainable structures then construction with concrete can display its strengths to the full if the regulations and the actions of all those involved in construction are directed towards this target parameter. We should therefore not succumb to the attempt to look for simple solutions: compressive strength alone does not ensure durability. If construction with concrete ever loses the trust established over decades as a long-lasting construction material it would take just as long to win back this trust. In this connection it may also be necessary reconsider one or two aspects of the measures for ensuring the quality along the entire value-added chain. This is summarized appropriately by the sentence “Trust is good, control is better”.

Literatur / Literature

- [1] Musterbauordnung, MBO : Fassung November 2002
- [2] Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, Amtsblatt der Union L 88 vom 4.04.2011, S. 5–43
- [3] Forschungsinstitut der Zementindustrie: TB-BTe B2275-A-2/2011 Abschlussbericht „Auswirkungen der erweiterten europäischen Basisanforderungen für Bauwerke auf die Regelungen der harmonisierten technischen Spezifikationen (hEN und EAD)“ – 14.06.2011 Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBSR)
- [4] prEN 206:2012:E Concrete – Specification, performance, production and conformity (March 2012); nicht veröffentlicht
- [5] CUR-Aanbeveling 48:2010: Assessment of the suitability of new cements for use in concrete and of the equivalent performance of concrete with additions. Procedures, criteria and test methods
- [6] Dutch assessment procedures for certification BRL 1802. Kiwa-BMC, PO Box 150, 2800 AD Gouda NL
- [7] CEN/TC 104/SC1 N717: Draft CEN/TR “Use Of k-Value Concept, Equivalent Concrete Performance Concept And Equivalent Performance Of Combinations Concept” (Stand: 26.10.2011); nicht veröffentlicht
- [8] CEN/TC 104/SC 1 N 687: Report to CEN TC 104 SC1 on activities in TG 10 “conformity evaluation” (Juni 2011); nicht veröffentlicht
- [9] CEN/TC 104/SC 1 N 686: Use of control charts in the production of concrete (October 2010); nicht veröffentlicht
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Erläuterungen zur Herausnahme der Anforderungen und Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WS aus der Richtlinie (April 2010)
- [11] Stark, J.; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Erfurt, D.: 70 years of ASR with no end in sight? ZKG International 63 (2010) H. 4 und H. 5, S. 86–95 und S. 55–70
- [12] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren. Straße und Autobahn 102 (2007) H. 8, S. 528–538
- [13] Müller, C.; Severins, K.; Hauer, B.: Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttensand und Flugasche. beton 59 (2009) H. 10, S. 469–478, H. 11, S. 531–537
- [14] Eickschen, E.; Müller, C.: Dauerhaftigkeit von Fahrbanddeckenbeton in Waschbetonbauweise. Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton (2010) H. 1, S. 2–10
- [15] Breitenbücher, R.; Sievering, C.; Schießl, P.; Wenzel, P.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Siebel, E.; Müller, C.; Eickschen, E.; Böhm, M.: Rissbildung an Fahrbanddecken aus Beton: Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) – Phase 1. In-situ-Untersuchungen an Fahrbanddecken aus Beton mit/ohne Risse. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2010
- [16] Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ; F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar, FIB: 2. Entwurf des Technischen Schlussberichts AKR im Betondeckenbau – AKR-Untersuchungen an Fahrbanddecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche, Untersuchungen im Rahmen des FE-Vorhabens 89.214/2008/AP – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (Auftraggeber). Düsseldorf 2010; nicht veröffentlicht
- [17] Müller, C.; Borchers, I.: AKR – Nur Probleme oder auch Lösungen? 3. Betonfachtagung Nord: Das Bauen mit Beton aus dem Blickwinkel der Dauerhaftigkeit und neuer Regelwerke, Braunschweig 29./30. September 2011
- [18] FGSV Arbeitskreis 8.2.3 „AKR“: WS-Grund- und Bestätigungsprüfung; WS-Grund- und Bestätigungsprüfung zur Beurteilung der Eignung von groben Gesteinskörnungen für die Feuchtigkeitsklasse WS – 9. Entwurf, Juli 2011
- [19] Zahlen und Daten. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Berlin 2010
- [20] Tätigkeitsbericht des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. 2007–2009, Düsseldorf 2009
- [21] Müller, C.; Lang, E.: Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositement CEM II/M (S-LL). beton 55 (2005) H. 3, S. 131–138; H. 4, S. 197–202 und H. 5, S. 266–269
- [22] Proske, T.: Carbonatisierung von Beton mit reduziertem Zementgehalt. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung (ibausil) 2009, S. 2-0717 bis 2-0722
- [23] Oner, A.; Akyuz, S.: An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. Cement & Concrete Composites (2007) H. 6
- [24] Schneider, E.; Guse, U.; Müller, H. S.: Zur Wirksamkeit von Flugasche im Beton. beton 55 (2005) H. 10, S. 488–494
- [25] Bleszynski, R.; Hooton, R.D.; Thomas, M. D.; Rogers, C. A.: Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag. ACI Materials Journal (2002) H. 5
- [26] Bager, Dirch H.; Nordic Concrete Federation: Durability of exposed concrete containing secondary cementitious materials, Workshop proceeding from a nordic miniseminar, Tagungsband, 2002
- [27] Elahi, A.; Basheer, P.A.; Nanukuttan, S.V.: Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials (2010) H. 3
- [28] Müller, C.; Palm, S.: Zemente mit geringem Portlandzementklinkeranteil für die Betone der Zukunft. Tagungsunterlagen 55. BetonTage 2011, S. 86–89
- [29] VDZ-Mitteilungen Nr. 147, Düsseldorf 2011
- [30] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff – Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Schriftenreihe des DAfStb, Heft 569, Berlin 2007
- [31] Stark, D.: Performance of concrete in sulphate environments. Portland Cement Association, Skokie, USA 2002



Christoph Müller, Ingmar Borchers, Eberhard Eickschen, Düsseldorf

Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance- und WS-Grundprüfungen

Experience with ASR test methods: advice on obtaining practical evaluation criteria for performance testing and aggregate testing

Inhaltsübersicht

Mit AKR-Performance-Prüfungen kann die Alkaliempfindlichkeit von Betonen für Fahrbahndecken der Feuchtigkeitsklasse WS bewertet werden. Im vorliegenden Beitrag wird der Bewertungshintergrund für den „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ vorgestellt. Es wurden verschieden stark geschädigte Betonfahrbahndecken in Schadenskategorien eingestuft, daraus Bohrkern entnommen und mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen geprüft. Die Prüfungen wurden mit einer 3%igen und mit einer 10%igen Natriumchlorid-Lösung (NaCl) durchgeführt. Für beide Fälle werden Bewertungskriterien hergeleitet. Zur Herleitung der Bewertungskriterien wurden außerdem die tiefenabhängigen Gehalte wasserlöslicher Chloride in Fahrbahndeckenbetonen und in Laborprüfkörpern nach Abschluss von AKR-Performance-Prüfungen verglichen. Zusätzlich wurden die Ergebnisse von Vergleichsversuchen des 60 °C-Betonversuchs mit der Klimawechsellagerung jeweils mit Alkalizufuhr von außen herangezogen. Die Bewertungskriterien können gleichermaßen für AKR-Performance-Prüfungen (Bewertung eines Betons) wie für WS-Grundprüfungen (Bewertung einer Gesteinskörnung) angewendet werden.

1 Einleitung

Erste Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) traten in Deutschland Ende der 1960er Jahre in Schleswig-Holstein u. a. an Industrieanlagen, Kaimauern und Brücken auf [1]. Das Regelwerk zur Vermeidung von AKR-bedingten Schäden an Betonbauwerken, die Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), wurde seitdem konsequent weiterentwickelt. Mit der in 2012 gültigen Alkali-Richtlinie einschließlich der 1. und 2. Berichtigung (April 2010 und April 2011) liegen deskriptive Regeln vor, mit denen in allen Bereichen des Hoch- und Ingenieurbaus (Feuchtigkeitsklassen WO, WF, WA) sicher gebaut werden kann. Seit der ersten Fassung der Alkali-Richtlinie von 1974 [2] wurde sie mehrfach erweitert, sodass sie mit der Zeit schwer verständlich wurde. Die Richtlinie wird derzeit redaktionell überarbeitet, sodass sie entsprechend der Struktur europäischer Normen aufgebaut sein wird und damit in der Praxis wieder besser verstanden werden kann.

Ab 1996 zeigten sich erstmals AKR-bedingte Schäden an Betonfahrbahndecken auf Bundesautobahnen in Südwestdeutschland. Mit weiteren Schäden auf Autobahnen in Mitteldeutschland begann die Entwicklung von AKR-Performance-Prüfverfahren. Die Entwicklung der Verfahren folgte der Erkenntnis, dass folgende Betonbauteile durch Tausalz-/Taumittelwirkung und hohe dynamische Lasten aus Verkehr besonders hohen Beanspruchungen ausgesetzt sind und mit den gängigen deskriptiven Regeln nicht mehr angemessen behandelt werden [3]:

Abstract

The alkali reactivity of concretes for road pavements in the WS moisture class can be evaluated with ASR (alkali-silica reaction) performance tests. This article presents the background to the evaluation of the „60 °C concrete test with external supply of alkalis“. Concrete road pavements that had been damaged to differing extents were classified into damage categories. Drill cores were then taken from them and tested with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis. The tests were carried out with 3 % and 10 % sodium chloride (NaCl) solutions. Evaluation criteria were derived for both cases. The evaluation criteria were also derived by comparing the depth-dependent levels of water-soluble chlorides in concrete road pavements and in laboratory test specimens after conclusion of the ASR performance tests. The results of comparison trials of the 60 °C concrete test with the cyclic climate storage – in each case with external addition of alkalis – were also used. The evaluation criteria can be applied equally for ASR performance testing (evaluation of a concrete mixture) and for aggregate testing (evaluation of an aggregate).

1 Introduction

Initial cases of damage due to alkali-silica reactions (ASR) appeared in Germany at the end of the 1960s in Schleswig-Holstein in industrial plants, quay walls and bridges [1]. The body of rules for avoiding damage in concrete structures caused by ASR, the Alkali Guidelines issued by the DAfStb (German Committee for Structural Concrete), have been consistently revised since then. Descriptive rules with which it is safe to build in all areas of building construction and civil engineering (moisture classes WO, WF, WA) are available in the form of the 2012 Alkali Guidelines, including the 1st and 2nd revisions (April 2010 and April 2011). The first version of the Alkali Guidelines of 1974 [2] has been extended several times with the result that with time they became difficult to understand. The Guidelines are currently being re-edited so that they correspond to the structure of European standards and will be easier to understand in practice.

The first cases of damage due to ASR in concrete road pavements appeared from 1996 in federal motorways in south-west Germany. The development of ASR performance test methods began when further cases of damage in motorways appeared in central Germany. The development of the methods followed the finding that the following concrete structural elements were subject to particularly severe stresses due to the effects of de-icing salt / de-icing chemicals and heavy dynamic traffic loads and were no longer dealt with appropriately by the current descriptive rules [3]:

- concrete roads of the SV and I to III construction classes as specified in the RStO
- airfields made of concrete.

- Betonfahrbahnen der Bauklassen SV und I bis III nach RStO
- Flugbetriebsflächen aus Beton.

Um die Alkaliempfindlichkeit von Betonen für diese Bauteile untersuchen zu können, wurde an der Bauhaus-Universität Weimar (FIB) und im Forschungsinstitut in Düsseldorf (FIZ) jeweils ein Verfahren entwickelt: Betonversuch mit „Klimawechsellagerung“ [4] und der „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ [5, 6]. Beide Verfahren führen zu einer vergleichbaren Bewertung identischer Betone und sind vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) anerkannt [7, 8].

Die Festlegung der Bewertungskriterien muss unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren zwei wesentlichen Anforderungen genügen:

- Zielsichere Vermeidung von AKR-Schäden
- Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Betonbauweise.

Um dem letztgenannten Aspekt zu genügen, müssen nicht nur die Fälle erfasst und zukünftig ausgeschlossen werden, die nachweislich zum Schaden geführt haben. Es muss auch weiterhin möglich sein, mit den Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen zu bauen, die sich in der Praxis nachweislich bewährt haben.

Für den „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ wurde zunächst ein Grenzwert von 0,5 mm/m nach zehn Zyklen der Wechsellagerung bei Prüfung mit einer 10 %igen NaCl-Lösung festgelegt [5, 6]. Mithilfe dieses Grenzwerts soll zwischen Betonen unterschieden werden, mit denen über die Nutzungsdauer der Betonfahrbahndecke mit Schäden bzw. keinem Schaden infolge einer AKR zu rechnen ist. Das BMVBS wird in 2013 über ein neues Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) eine „WS-Grundprüfung“ einführen. Mit dieser Prüfung soll die Eignung grober Gesteinskörnungen für Fahrbahndecken aus Beton der Feuchtigkeitsklasse WS beurteilt werden. Wesentlicher Bestandteil ist der „WS-Betonversuch“, mit dem eine grobe Gesteinskörnung in einer pessimalen Betonzusammensetzung entweder mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ oder mit der Klimawechsellagerung untersucht werden soll. Auch für diese Anwendung der Betonversuche bedarf es praxisgerechter Bewertungskriterien.

2 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen war die Herleitung praxisgerechter Kriterien für die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen bzw. Gesteinskörnungen zur Verwendung in der Feuchtigkeitsklasse WS für den „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“. Es wurden Bohrkern aus verschiedenen stark geschädigten Betonfahrbahndecken untersucht. Die Bohrkern und zusätzlich Laborbetone wurden jeweils mit einer 3 %igen und mit einer 10 %igen Natriumchlorid-Lösung (NaCl) geprüft, um einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der beiden NaCl-Konzentrationen und der Zustandsbeschreibung von Fahrbahndecken durch Schadenskategorien ableiten zu können. Des Weiteren wurden Betone von zwei Fahrbahndecken durch Laborbetone nachgestellt und geprüft. Die Laborbetone wurden mit aktuellen Lieferungen der Ausgangsstoffe der Fahrbahndeckenbetone hergestellt. Schließlich wurden für identisch zusammengesetzte Betone die Ergebnisse der 60 °C-Betonversuche mit einer 3 %igen bzw. einer 10 %igen NaCl-Lösung mit den Ergebnissen der Klimawechsellagerung verglichen. Ergänzende Informationen lieferte der Vergleich von Chloridprofilen an den Probekörpern eines Betons nach Abschluss der AKR-Performance-Prüfungen mit dem Chloridprofil von Bohrkernen aus Fahrbahndecken und von einem Laborbeton nach der Klimawechsellagerung.

3 Untersuchungen

3.1 Zustandsbeschreibung von Fahrbahndecken durch Schadenskategorien

Der Zustand AKR-geschädigter Fahrbahndecken aus Beton kann durch drei Schadenskategorien nach Tafel 1 beschrieben werden [9]. Sie wurden aufgestellt, um angemessene Instandsetzungsmaßnahmen zur baulichen Erhaltung AKR-geschädigter Fahrbahndecken aus Beton festlegen zu können. Wenn in einer Fahrbahndecke Alkalihydroxide mit alkaliempfindlichen Gesteinskör-

The Bauhaus University Weimar (FIB) and the Research Institute in Düsseldorf (FIZ) each developed a method for investigating the alkali reactivity of concretes for these structural elements, namely the concrete test with “cyclic climatic storage” [4] and the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” [5, 6]. The two methods lead to comparable evaluation of identical concretes and are recognized by the BMVBS (Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development) [7, 8].

Regardless of the test method used the establishment of the evaluation criteria must satisfy two important criteria:

- avoidance of ASR damage
- retention of the competitiveness of concrete construction.

In order to satisfy the latter aspect it is necessary not just to account for and in future exclude the cases that have demonstrably led to damage. It must also continue to be possible to build with the concrete mixture and aggregates that have proved successful in practice.

Initially, a limit of 0.5 mm/m after ten cycles of the cyclic storage was set for the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” when testing with a 10 % NaCl solution [5, 6]. By using this limit it should be possible to differentiate between those concretes for which damage due to an ASR is to be expected during the working life of the concrete road pavements and those for which no damage is expected. The BMVBS is introducing a WS aggregate test in 2013 through a new General Road Construction Circular. This test is intended to assess the suitability of coarse aggregates for road pavements made with concrete of the WS moisture class. One important component is the “WS concrete test” with which a coarse aggregate is to be investigated in an unfavourable concrete composition either with the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” or with cyclic climate storage. Evaluation criteria that meet practical requirements are also needed for this application of the concrete tests.

2 Purpose of the investigation

The purpose of the investigation was to derive practical criteria for the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” for evaluating the alkali reactivity of concretes and aggregates for use in the WS moisture class. Drill cores taken from concrete road pavements that had been damaged to differing extents were examined. The drill cores and additional laboratory concretes were each tested with 3 % and 10 % sodium chloride solutions (NaCl) in order to derive a relationship between the use of the two NaCl concentrations. Moreover, the relation between the test results and the damage categories, which describe the condition of the road pavements, should be established. The concretes from two road pavements were also simulated by laboratory concretes and tested. The laboratory concretes were produced with current charges of concrete constituents for the road pavements. Finally, the results of the 60 °C concrete test with 3 % and 10 % NaCl solutions were compared with the results of the cyclic climate storage for concretes with identical compositions. Additional information was provided by comparison of the chloride profiles in the test specimens made from a concrete after conclusion of the ASR performance tests with the chloride profiles of drill cores from road pavements and from a laboratory concrete after cyclic climate storage.

3 Investigations

3.1 Description of the condition of road pavements by damage category

The condition of road pavements damaged by ASR can be described by three damage categories as shown in Table 1 [9]. They were established in order to be able to specify appropriate repair measures for structural maintenance of concrete road pavements damaged by ASR. When alkali hydroxides react with alkali-reactive aggregates in a road pavement the first sign is usually discolouration of the transverse joint and joint intersection areas. In this condition the road pavement may possibly exhibit shrinkage cracks but no ASR-induced cracks. Road pavements with these features are assigned to damage category I. If the ASR progresses

Tafel 1: Zuordnung der Merkmale zu Schadenskategorien nach [9]

Table 1: Allocation of the features to damage categories as defined in [9]

Schadenskategorie Damage category	Schadensmerkmale Damage features
I	– Verfärbung im Bereich der Quertugen/Fugenkreuze (i. A. beginnend im Fugenkreuz) – <i>discolouration in the area of the transverse joints / joint intersections (generally starting at the joint intersection)</i> – keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildung – <i>no cracking beyond shrinkage cracks</i>
II	– ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen – <i>marked discolouration in joint areas</i> – Rissbildungen in Fugenkreuzbereichen – <i>cracking in the joint intersection areas</i> – beginnende bis ausgeprägte Netzrissbildung – <i>incipient to marked cracking</i> – ggf. Längs- und Querrisse an den Quertugen – <i>possible longitudinal and transverse cracks at the transverse joints</i> – ggf. zusätzliche Längsrissbildung in Rüttelgassen, noch kein Substanzverlust – <i>possible additional longitudinal cracking in vibration channels, but still no loss of substance</i>
III	– ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen – <i>marked discolouration in the joint areas</i> – sehr ausgeprägte Rissbildung (häufig mit Verfärbungen) – <i>very marked cracking (often with discolouration)</i> – ggf. Kantenschäden und/oder Eckabbrüche – <i>possible edge damage and/or broken corners</i> – ggf. Substanzverlust, z. B. Verschotterung – <i>possible loss of substance, e.g. crumbling</i>

nungskörnungen reagieren, verfärbt sich i. d. R. zunächst der Bereich der Quertugen und der Fugenkreuze. In diesem Stadium weist die Fahrbahndecke evtl. Schwindrisse, aber keine AKR-induzierten Risse auf. Fahrbahndecken mit diesen Merkmalen werden der Schadenskategorie I zugeordnet. Schreitet die AKR weiter fort, dann bilden sich Risse. Eine beginnende und ausgeprägte Netzrissbildung sowie ausgeprägte Verfärbungen im Fugenbereich kennzeichnen die Schadenskategorie II. Die Risse schwächen das Betongefüge und durch die mechanische Verkehrsbelastung brechen die Kanten der Quertugen. Dieser Zustand wird mit der Schadenskategorie III beschrieben, bei der Substanzverlust auftritt und es zur Verschotterung der Quertuge kommt.

3.2 Bohrkerne aus Fahrbahndecken

Aus Fahrbahndecken mehrerer deutscher Autobahnen in Betonbauweise wurden Bohrkerne (Ø 15 cm/Höhe rd. 30 cm) entnommen. Die Fahrbahndecken wurden visuell bei einer Streckenbeurteilung beurteilt und einer Schadenskategorie zugeordnet. In Tafel 2 sind wesentliche Informationen zu den Bohrkernen, den Fahrbahndecken und deren Schadenskategorie zusammengefasst. Alle Daten zu den Bohrkernen 1 bis 4, 6 sowie 9 bis 11 sind [10] entnommen. Alle Bohrkerne stammen jeweils aus dem ersten Fahrstreifen, der durch den LKW-Verkehr am stärksten belastet ist. Eine Ausnahme ist Bohrkern 5, der aus dem Seitenstreifen entnommen wurde.

Die Bohrkerne wurden durch Sägen in Längsrichtung halbiert. Auf zwei Seiten wurden Messmarken für die Längenmessung aufgeklebt, um sie anschließend mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ gemäß dem Lagerungsplan in Tafel 3 zu prüfen. Die Versuche wurden mit einer 3 %igen NaCl-Lösung durchgeführt. Mit den Versuchen sollte der Zusammenhang zwischen der in der Praxis beobachteten Schadenskategorie einer Fahrbahndecke und dem Restdehnungspotenzial des Betons im „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ aufgezeigt werden. Auf der Grundlage dieses Zusammenhangs sollte ein Beurteilungskriterium für die Betonprüfungen mit Alkalizufuhr im 60 °C-Betonversuch abgeleitet werden.

then cracks are formed. Damage category II is characterized by incipient to marked cracking and marked discolouration in the joint areas. The cracks weaken the concrete microstructure, and the edges of the transverse joints are broken by the mechanical stresses from vehicles. This condition is described by damage category III in which loss of substance occurs together with crumbling of the transverse joints.

3.2 Drill cores from road pavements

Drill cores (15 cm diameter x approx. 30 cm) were taken from the road pavements of several concrete motorways in Germany. The road pavements were assessed visually and allocated to a damage category during visits to the sections. Essential information about the drill cores, the road pavement and their damage categories is listed in Table 2. All the data on drill cores 1 to 4, 6 and 9 to 11 were taken from [10]. Each of the drill cores was taken from the first traffic lane, which is the lane most heavily stressed by the lorry traffic. An exception to this was drill core 5, which was taken from the hard shoulder.

The drill cores were sawn in half lengthwise. Measuring studs for the longitudinal measurements were attached to the two ends for subsequent testing with the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” in accordance with the storage plan in Table 3. The trials were carried out with a 3 % NaCl solution. The trials were intended to indicate the relationship between the damage category of a road pavement observed in practice and the residual expansion potential of the concrete in the “60 °C concrete test with external supply of alkalis”. On the basis of this relationship it should be possible to derive an assessment criterion for the concrete tests with external supply of alkalis in the 60 °C concrete test.

3.3 Influence of the sodium chloride concentration

The 60 °C concrete tests were carried out on different laboratory concretes and half drill cores in parallel with 3 % and 10 % NaCl solutions. These tests were intended to indicate the relationship between the results when using the two NaCl concentrations. Knowledge of this relationship might make it possible to apply results from tests with 3 % NaCl solution to tests that were carried out with 10 % NaCl solution. This also made it possible to compare the assessment criteria with one another.

Tafel 2: Informationen zu den untersuchten Autobahnlosen und Einordnung in eine Schadenskategorie nach [9]

Table 2: Information on the sections of motorway investigated and classification in damage categories as defined in [9]

Autobahnlos Motorway section	Alter bei Probenahme in Jahren Age on sampling in years	Entnahmestelle Sampling point	Schadenskate- gorie nach [9] Damage cate- gory acc. to [9]	Verfärbung der Fuge Discolouration of the joints	Netzrisse Cracking	Längs- und Querrisse Longitudinal and transverse cracks	Substanz- schäden Substance damage
1	9	1. FS 1 st TL	III	n. e. n.r.	ja yes	Längsrisse, Querrisse Longitudinal cracks, trans- verse cracks	ja yes
2	15	1. FS 1 st TL		n. e. n.r.	ja yes		ja – vereinzelt yes, occasional
3	9	1. FS 1 st TL		n. e. n.r.	ja yes		ja yes
4	12	1. FS 1 st TL		ja yes	ja yes	ja yes	ja yes
5	12	SS HS	II	ja yes	ja, starke Rissbildung yes, severe cracking	nein no	nein no
6	14	1. FS 1 st TL		n. e. n.r.	ja yes	Längsrisse longitudinal cracks	nein no
7	12	1. FS 1 st TL		nein no	ja yes	leichte Längsrisse small longitudi- nal cracks	nein no
8	18	1. FS 1 st TL	I	nein no	ja, geringe Rissbildung yes, slight cracking	nein no	nein no
9	10	1. FS 1 st TL		nein no	Schwindrisse shrinkage cracks	nein no	nein no
10	12	1. FS 1 st TL		nein no		nein no	nein no
11	16	1. FS 1 st TL	kein Schaden no damage	nein no	sehr feine Schwindrisse very fine shrinkage cracks	nein no	nein no

1. FS = erster Fahrstreifen; SS = Seitenstreifen

1st TL = first traffic lane; HS = hard shoulder

n. e.: nicht erfasst

n.r.: not recorded

Tafel 3: Lagerungsplan im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen

Table 3: Storage plan in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis

Lagerungsphase Storage phase	Lagerungsdauer Storage time	Messung am Ende der Lagerung Measurement at end of storage	Klima Climate
Probenvorbereitung, Kleben von Messmarken Sample preparation, attachment of measuring studs	–	–	20 °C und 65 % r. F. 20 °C and 65 % r.h.
Vorlagerung 7 d Preliminary storage 7 d	6 d	–	60 °C und $\geq$ 98 % r. F. 60 °C and $\geq$ 98 % r.h.
	1 d	Nullmessung zero measurement	20 °C und $\geq$ 98 % r. F. 20 °C and $\geq$ 98 % r.h.
Wechselagerung im Turnus von 14 d Alternating storage every 14 d	5 d	–	60 °C im Trockenschrank 60 °C in drying cabinet
	2 d	–	20 °C in NaCl-Prüflösung 20 °C in NaCl test solution
	6 d	–	60 °C und $\geq$ 98 % r. F. 60 °C and $\geq$ 98 % r.h.
	1 d	Messung measurement	20 °C und $\geq$ 98 % r. F. 20 °C and $\geq$ 98 % r.h.

Tafel 4: Laborbeton 1 = Nachgestellter Beton des Autobahnloses A10-8, entspricht Autobahnlos 1 und 3 in Tafel 2; Daten entnommen aus [10]
Table 4: Laboratory concrete 1 = replicated concrete from motorway section A10-8, corresponds to motorway sections 1 and 3 in Table 2; data taken from [10]

Ausgangsstoffe Starting material	Korngruppe [mm] Size range [mm]	Anteil [Vol.-%] Proportion [vol. %]	Gehalt ³⁾ [kg/m ³] Content ³⁾ [kg/m ³]
Sand	0/2	30 ¹⁾	543
Kies / Gravel	2/8	20 ¹⁾	359
Kies / Gravel	8/16	10 ¹⁾	180
Granodiorit-Splitt Crushed Grandiorite	16/22	40 ¹⁾	726
Zement CEM I 42,5 N ²⁾ CEM I 42,5 N ²⁾ cement	–	–	340
Zugabewasser (w/z = 0,46) Mixing water (w/c = 0.46)	–	–	156
Luftgehalt / Air content	–	5,0 ³⁾	–

¹⁾ Bezug: Gesteinskörnung / W.r.t.: aggregate ²⁾ Na₂O-Äquivalent = 0,85 M.-% (0,81 M.-% durch Zement + 0,04 M.-% durch Zugabe von K₂SO₄) / Na₂O equivalent = 0.85 mass % (0.81 mass % of Cement + 0.04 mass % by addition of K₂SO₄) ³⁾ Bezug: Beton / W.r.t.: concrete

Tafel 5: Laborbeton 9 = Nachgestellter Beton des Autobahnloses A40-7, Autobahnlos 9 in Tafel 2; Daten entnommen aus [10]
Table 5: Laboratory concrete 9 = replicated concrete from motorway section A40-7, motorway section 9 in Table 2; data taken from [10]

Ausgangsstoffe Starting material	Korngruppe [mm] Size range [mm]	Anteil [Vol.-%] Proportion [vol. %]	Gehalt ³⁾ [kg/m ³] Content ³⁾ [kg/m ³]
Sand	0/2	28,2 ¹⁾	512
Kies / Gravel	2/8	34,2 ¹⁾	623
Grauwacke-Splitt Crushed Greywacke	8/11	27,3 ¹⁾	510
Grauwacke-Splitt Crushed Greywacke	11/16	10,2 ¹⁾	191
Zement CEM I 42,5 N ²⁾ CEM I 42,5 N ²⁾ cement	–	–	351
Zugabewasser (w/z = 0,42) Mixing water (w/c = 0.42)	–	–	147
Luftgehalt / Air content	–	5,0 ³⁾	–

¹⁾ Bezug: Gesteinskörnung / W.r.t.: aggregate

²⁾ Na₂O-Äquivalent = 0,81 M.-% anstelle von 0,78 M.-% des ursprünglichen Zementes / Na₂O equivalent = 0.81 mass % instead of 0.78 mass % in the original cement

³⁾ Bezug: Beton / W.r.t.: concrete

3.3 Einfluss der Natriumchlorid-Konzentration

60 °C-Betonversuche wurden an verschiedenen Laborbetonen und Bohrkernhälften parallel mit einer 3 %igen und mit einer 10 %igen NaCl-Lösung durchgeführt. Mit diesen Versuchen sollte der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der beiden NaCl-Konzentrationen aufgezeigt werden. In Kenntnis dieses Zusammenhangs ließen sich ggf. Ergebnisse aus Prüfungen mit einer 3 %igen NaCl-Lösung auf Prüfungen übertragen, die mit einer 10 %igen NaCl-Lösung durchgeführt wurden. Auch die Beurteilungskriterien ließen sich auf diesem Wege miteinander vergleichen.

3.4 Nachgestellte Betone von Fahrbahndecken

Die Betone einer geschädigten (Autobahnlose 1 und 3 mit gleicher Betonzusammensetzung, s. Tafel 2) und einer ungeschädigten Fahrbahndecke (Autobahnlos 9, s. Tafel 2) wurden im Labor nachgestellt. Die Betone werden nachfolgend als Laborbeton 1 bzw. Laborbeton 9 bezeichnet. Diese Betone wurden mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ unter Verwendung einer 3 %igen bzw. einer 10 %igen NaCl-Lösung untersucht. In den Tafeln 4 und 5 sind die Betonrezepturen zusammengestellt, die [10] entnommen wurden. Es wurden aktuelle Proben der Gesteinskörnung der entsprechenden Lieferwerke verwendet und Zement eines Werks eingesetzt, dessen Portlandzement ein vergleichbares Na₂O-Äquivalent aufwies. Mit diesen Prüfungen sollten die Bewer-

3.4 Simulated road pavement concretes

The concretes from damaged road pavement (motorway sections 1 and 3 with the same concrete composition, see Table 2) and an undamaged road pavement (motorway section 9, see Table 2) were simulated in the laboratory. The concretes are designated below as laboratory concrete 1 and laboratory concrete 9 respectively. These concretes were investigated with the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” using 3 % and 10 % NaCl solutions. The concrete mix formulations, which were taken from [10], are listed in Tables 4 and 5. Current samples of the aggregate from the corresponding supply plants were used together with cement from a plant where the Portland cement had a comparable Na₂O equivalent. These tests were intended to confirm the evaluation criteria that were derived from the trials described in Sections 3.2 and 3.3.

3.5 Comparison of the 60 °C concrete test with the cyclic climate storage

Comparative investigations of ASR performance testing have been carried out during the past few years at the Research Institute (60 °C concrete test with and without external supply of alkalis) and at the Bauhaus University Weimar (cyclic climate storage) on a total of 18 concretes [7, 8, 11]. The concretes were made up as follows from the same starting materials:

- w/c = 0.42, c = 370 kg/m³, air void content: 4.5 ± 0.5 vol. % and
- w/c = 0.42, c = 430 kg/m³, air void content: ≥ 5.5 vol. %.

tungskriterien bestätigt werden, die aus den Versuchen abgeleitet wurden, die in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben wurden.

3.5 Vergleich 60 °C-Betonversuch und Klimawechslagerung

In den vergangenen Jahren wurden vergleichende Untersuchungen zur AKR-Performance-Prüfung im Forschungsinstitut (60 °C-Betonversuch ohne und mit Alkalizufuhr von außen) und an der Bauhaus-Universität Weimar (Klimawechslagerung) an insgesamt 18 Betonen durchgeführt [7, 8, 11]. Die Betone waren aus den gleichen Ausgangsstoffen wie folgt zusammengesetzt:

- w/z = 0,42, z = 370 kg/m³, LP-Gehalt: 4,5 ± 0,5 Vol.-% bzw.
- w/z = 0,42, z = 430 kg/m³, LP-Gehalt: ≥ 5,5 Vol.-%.

Unterschiedliche Gesteinskörnungen und Portlandzemente (Na₂O-Äquivalent zwischen 0,56 und 0,89 M.-%) wurden verwendet. Die 60 °C-Betonversuche wurden mit einer 3 %igen und einer 10 %igen NaCl-Lösung und die Klimawechslagerung mit einer 0,6 molaren NaCl-Lösung durchgeführt.

3.6 Chloridprofil im Beton bei Alkalizufuhr von außen

Zur Abschätzung des Eindringverhaltens von Natriumchlorid in Beton während des 60 °C-Betonversuchs wurde der Chloridgehalt von zwei Betonbalken des Laborbetons 9 (s. Abschnitt 3.4) nach elf Zyklen der Wechsellagerung über den Querschnitt bestimmt. Dazu wurden von den Betonbalken allseitig 10 mm dicke Scheiben gesägt. Die Scheiben wurden analysenfein gemahlen, der wasserlösliche Chloridgehalt nach DIN EN 196-2 wurde bestimmt und auf den Zementsteinanteil bezogen. Die Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen der Untersuchungen des IGF-Vorhabens 15977 N [12] verglichen. In [12] war der Chloridgehalt an Betonbohrkernen aus 20 Jahre alten Fahrbahndecken und an Laborprobekörpern aus dem 60 °C-Betonversuch und der Klimawechslagerung bestimmt worden.

Different aggregates and Portland cements (Na₂O equivalents between 0.56 and 0.89 mass %) were used. The 60 °C concrete tests were carried out with 3 % and 10 % NaCl solutions and the cyclic climate storage was carried out with a 0.6 molar NaCl solution.

3.6 Chloride profile in concrete with external supply of alkalis

The levels of chloride in two concrete beams made with laboratory concrete 9 (see Section 3.4) after eleven cycles of alternating storage were determined over the cross-section to assess the penetration behaviour of sodium chloride in concrete during the 60 °C concrete test. 10 mm thick slices were sawn from all sides of the concrete beams for this purpose. The slices were ground to analysis fineness and the levels of water-soluble chloride were determined as specified in DIN EN 196-2 and related to the content of hardened cement paste. The results were compared with the results of the investigations of IGF Project 15977 N [12]. The levels of chloride in concrete drill cores from 20-year-old road pavements and in laboratory test pieces from the 60 °C concrete test and the cyclic climate storage had been determined in [12].

4 Results

4.1 Drill cores from road surfaces

The expansions of the half drill cores in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis in the form of 3 % NaCl solution are shown in Fig. 1 and in an extract in Fig. 2. The markers have been coloured to correspond to the damage categories of the road pavements. After ten cycles (140 days) the half drill cores from road pavements in damage category III exhibited expansions between 0.5 and 1.8 mm/m.

The half drill cores from two road pavements in damage category II expanded between 0.4 mm/m and 0.6 mm/m. The expansions of the half drill cores from road pavements in damage category I lay between 0.1 mm/m and 0.3 mm/m (see Fig. 2). The half drill cores

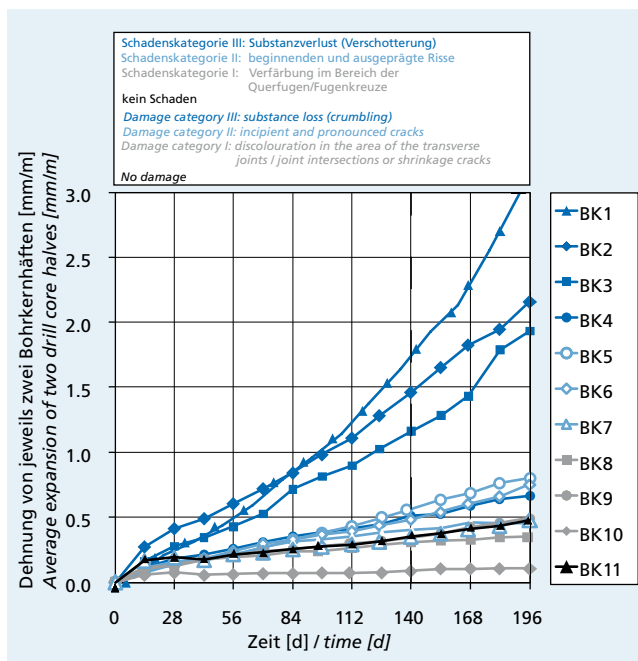


Bild 1: Dehnungen von Bohrkernhälften (Mittelwert aus zwei Bohrkernhälften) aus verschieden stark geschädigten Fahrbahndecken im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige NaCl-Lösung; Daten teilweise aus [10] entnommen
Figure 1: Expansion of drill core halves (average from two drill core halves) taken from road pavements that had been damaged to differing extents and tested in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis by a 3 % NaCl solution; some data are taken from [10]

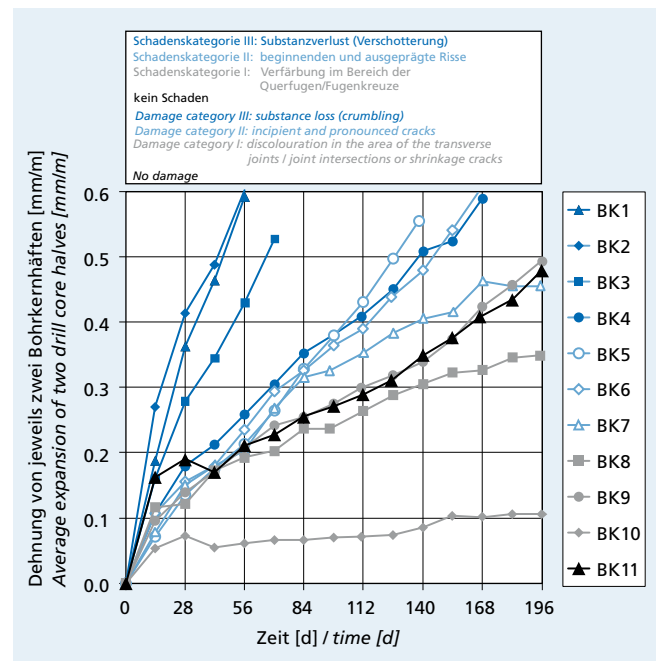


Bild 2: Dehnungen von Bohrkernhälften (Mittelwert aus zwei Bohrkernhälften) aus verschieden stark geschädigten Fahrbahndecken im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige NaCl-Lösung (Ausschnitt aus Bild 1); Daten teilweise [10] entnommen
Figure 2: Expansion of drill core halves (average from two drill core halves) taken from road pavements that had been damaged to differing extents and tested in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis by a 3 % NaCl solution (detail from Fig. 1); some data are taken from [10]

4 Ergebnisse

4.1 Bohrkern aus Fahrbahndecken

Die Dehnungen der Bohrkernhälften im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung sind in Bild 1 und in einem Ausschnitt in Bild 2 dargestellt. Die Marker wurden entsprechend der Schadenskategorie der Fahrbahndecke eingefärbt. Bohrkernhälften aus Fahrbahndecken der Schadenskategorie III wiesen nach zehn Zyklen (140 Tage) Dehnungen zwischen 0,5 und 1,8 mm/m auf.

Die Bohrkernhälften von zwei Fahrbahndecken der Schadenskategorie II dehnten sich zwischen 0,4 mm/m und 0,6 mm/m. Die Dehnungen der Bohrkernhälften aus Fahrbahndecken der Schadenskategorie I lagen zwischen 0,1 mm/m und 0,3 mm/m (s. Bild 2). Die Bohrkernhälften aus einer Fahrbahndecke, die nach 16 Jahren keine Schäden (BK11) aufwies, dehnten sich rd. 0,3 mm/m. Mit einem Beurteilungskriterium der Dehnung von 0,3 mm/m nach zehn Zyklen (140 Tagen) konnten die Betone wie folgt unterschieden werden:

Betone aus Fahrbahndecken der ersten Fahrspur von Bundesautobahnen, die nach zehn bis 18 Jahren intensiver Nutzung keine Anzeichen einer schädigenden AKR oder leichte Netzzrisse, die nicht auf eine AKR zurückzuführen waren, oder Verfärbungen aufwiesen (kein Schaden bzw. Schadenskategorie I),

Betone aus Fahrbahndecken der ersten Fahrspur von Bundesautobahnen, die nach neun bis 15 Jahren Längs- und Querrisse aufwiesen und bei denen z. T. bereits Substanzverlust aufgetreten war (Schadenskategorien II und III).

4.2 Einfluss der Natriumchlorid-Konzentration

Um den Einfluss der Alkalizufuhr einer 3 %igen und einer 10 %igen NaCl-Lösung vergleichen zu können, wurden einige Bohrkernhälften und Laborbetone im 60 °C-Betonversuch mit beiden NaCl-Konzentrationen geprüft (Bild 3). Die Dehnungen mit einer 10 %igen NaCl-Lösung sind im Mittel etwa doppelt so hoch wie die Dehnungen bei einer 3 %igen NaCl-Lösung. Die Bewertung mit einem Kriterium der Dehnung von 0,3 mm/m bei einer 3 %igen NaCl-Lösung entspräche in etwa der Bewertung mit einem Kriterium der Dehnung von 0,6 mm/m bei einer 10 %igen NaCl-Lösung. In beiden Fällen wurde die Bewertung nach zehn Zyklen (140 Tage nach Ende der Vorlagerung) vorgenommen. In Bild 3 weichen die Ergebnisse bei drei Betonen von diesem Zusammenhang ab. Eine Ursache für das abweichende Verhalten kann derzeit nicht angegeben werden. Bei zwei Laborbetonen würde dies zu einer abweichenden Bewertung führen (Markierung durch grauen Kreis). Beide Betone wurden mit der gleichen präkambrischen Grauwacke hergestellt.

Gemäß Abschnitt 4.1 dürften folglich nach zehn bis 18 Jahren Nutzung bei allen Betonen, die in Bild 3 im blauen Bereich liegen, keine Anzeichen einer schädigenden AKR oder nur leichte Netzzrisse oder Verfärbungen in der Praxis auftreten.

4.3 Nachgestellte Betone von Fahrbahndecken

Die Dehnungen der Laborbetone 1 und 9 im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr sind in Bild 4 dargestellt. Auf der linken Seite sind die Dehnungen für eine 3 %ige NaCl-Lösung bei Verwendung eines Bewertungskriteriums für die Dehnung von 0,3 mm/m dargestellt; rechts sind die Dehnungen für eine 10 %ige NaCl-Lösung bei Verwendung eines Bewertungskriteriums für die Dehnung von 0,5 mm/m wiedergegeben. Bei einer 10 %igen NaCl-Lösung zeigten nach zehn Zyklen (168 Tage) beide Betone Dehnungen deutlich über dem Grenzwert von 0,5 mm/m, der bisher gemäß [5, 6] verwendet wurde. Gleiches würde bei Verwendung eines Bewertungskriteriums für die Dehnung von 0,6 mm/m gelten. Mit einem Beton vergleichbar dem Laborbeton 1 waren in der Praxis tatsächlich AKR-Schäden aufgetreten (siehe Autobahnlos 1 und Autobahnlos 3 in Tafel 2). Die Fahrbahndecke mit Laborbeton 9 war dagegen nach zehn Jahren der Schadenskategorie I zugeordnet worden (siehe Autobahnlos 9 in Tafel 2). Bei der Prüfung mit der 3 %igen NaCl-Lösung und einem Bewertungskriterium von 0,3 mm/m hätte der Laborbeton 9 die Prüfung bestanden. Der Laborbeton 1, dessen „zugehörige“ Fahrbahndecke geschä-

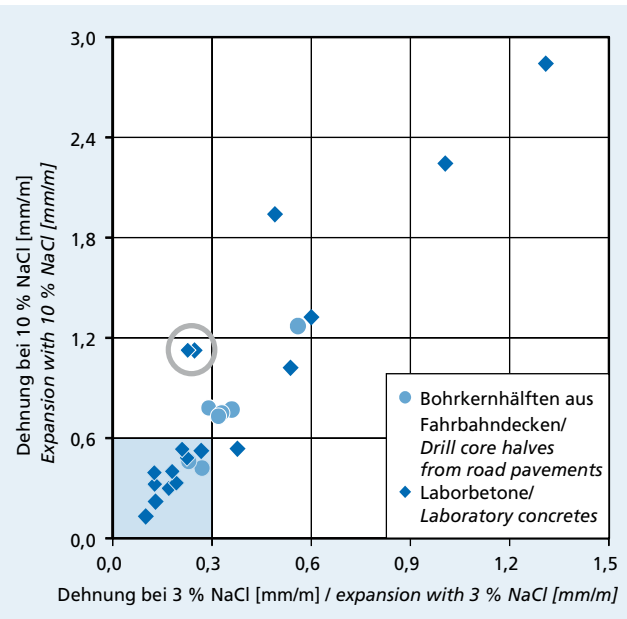


Bild 3: Dehnungen von Bohrkernhälften (Mittelwert aus zwei Bohrkernhälften) aus Fahrbahndecken und Laborbetonen nach zehn Zyklen (140 Tage nach Ende der Vorlagerung) im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige und eine 10 %ige NaCl-Lösung im Vergleich

Figure 3: Expansion of drill core halves (average from two drill core halves) taken from road pavements and laboratory concretes after ten cycles (140 days after the end of preliminary storage) and tested in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis by 3 % and 10 % NaCl solutions

from one road pavements that after 16 years exhibited no damage (BK11) expanded by about 0.3 mm/m. Using an expansion of 0.3 mm/m after ten cycles (140 days) as the assessment criterion it was possible to differentiate between the concretes as follows:

Concretes from road pavements in the first traffic lanes of federal motorways that after ten to 18 years of intensive use exhibited no signs of a harmful ASR or slight cracking that was not attributable to an ASR or discolouration (no damage or damage category I),

Concretes from road pavements in the first traffic lanes of federal motorways that after nine to 15 years exhibited longitudinal and transverse cracks and in which loss of substance had occurred in some cases (damage categories II and III).

4.2 Influence of the sodium chloride concentration

In order to be able to compare the influence of external supply of alkalis with 3 % and 10 % NaCl solutions some half drill cores and laboratory concretes were tested in the 60 °C concrete test with both NaCl concentrations (Fig. 3). The expansions with 10 % NaCl solution were on average about twice as high as the expansions with 3 % NaCl solution. The evaluation with an expansion of 0.3 mm/m as the criterion with 3 % NaCl solution corresponded approximately to the evaluation with an expansion of 0.6 mm/m as the criterion with 10 % NaCl solution. In both cases the evaluation was carried out after ten cycles (140 days after the end of preliminary storage). The results in Fig. 3 deviate from this relationship for three concretes. At present it is not possible to give the reasons for this deviant behaviour. For two laboratory concretes this would lead to a different evaluation (marked by a grey circle). Both concretes were produced with the same Precambrian greywacke.

In accordance with Section 4.1 this means that no indications of a harmful ASR or only slight cracking or discolouration should occur in practice after ten to 18 years use for all the concretes that lie in the blue region in Fig. 3.

4.3 Simulated road pavements concretes

The expansions of laboratory concretes 1 and 9 in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis are shown in Fig. 4.

digst war (Schadenskategorie III), wies nach zehn Zyklen Dehnungen oberhalb des Bewertungskriteriums von 0,3 mm/m auf. In diesem Fall könnte das Verhalten in der Praxis bei einer Prüfung mit der 3 %igen NaCl-Lösung und einem Bewertungskriterium von 0,3 mm/m besser abgebildet werden als mit einer 10 %igen NaCl-Lösung.

4.4 Vergleich 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr und Klimawechsellaagerung

In Bild 5 links sind die Dehnungen zum Beurteilungszeitpunkt in beiden Verfahren für 18 Betone gegenübergestellt. Sechs Ergebnisse stammen aus dem FE-Vorhaben 89.214/2008/AP „AKR im Betondeckenbau“ [11], das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beauftragt wurde. 17 Betone wurde mit beiden Verfahren vergleichbar bewertet, wenn nach acht Zyklen der Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung das Bewertungskriterium 0,5 mm/m und nach zehn Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr mit 10 %iger NaCl-Lösung das Bewertungskriterium 0,5 mm/m verwendet wird. In diesem Fall würde sich bei einem Beton eine abweichende Bewertung (hellblauer Marker) ergeben. Würde das Bewertungskriterium von 0,6 mm/m nach zehn Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit einer 10 %iger NaCl-Lösung verwendet werden, wären es vier Betone.

Bild 5 rechts zeigt den Vergleich der Ergebnisse zwischen dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr und der Klimawechsellaagerung, wenn der 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung durchgeführt wird und 0,3 mm/m als Bewertungskriterium angesetzt würden. Vier von 16 Betonen würden unterschiedlich bewertet werden, da vier Betone den 60 °C-Betonversuch bestanden, aber bei der Klimawechsellaagerung Dehnungen oberhalb des Grenzwerts aufwiesen.

4.5 Chloridprofil im Beton bei Alkalizufuhr von außen

Bild 6 zeigt den wasserlöslichen Chloridgehalt im Beton bezogen auf den Zementsteinanteil in Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche. Der Chloridgehalt wurde an Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken und an Prüfkörpern nach Abschluss der Klimawechsellaagerung (Probekörper bereitgestellt durch das F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde – Bauhaus-Universität Weimar) bzw. nach Abschluss des 60 °C-Betonversuchs mit Alkali-

The expansions with 3 % NaCl solution when using an evaluation criterion for the expansion of 0.3 mm/m are shown in the left side; on the right are the expansions with 10 % NaCl solution when using an evaluation criterion for the expansion of 0.5 mm. After ten cycles (168 days) with 10 % NaCl solution both concretes exhibited expansions significantly above the limit of 0.5 mm/m that had been used previously in accordance with [5, 6]. The same would have applied if an evaluation criterion for the expansion of 0.6 mm/m had been used. In practice ASR damage had actually occurred (see motorway sections 1 and 3 in Table 2) with a concrete comparable with laboratory concrete 1. On the other hand, after ten years the road pavement with laboratory concrete 9 had been allocated to damage category I (see motorway section 9 in Table 2). In the test with 3 % NaCl solution and an evaluation criterion of 0.3 mm/m the laboratory concrete 9 would have passed the test. After ten cycles the laboratory concrete 1, for which the “associated” road pavement had been damaged (damage category III), exhibited expansions above the evaluation criterion of 0.3 mm/m. In this case the behaviour in practice was better simulated by the test with 3 % NaCl solution and an evaluation criterion of 0.3 mm/m than with 10 % NaCl solution.

4.4 Comparison of cyclic climate storage with the 60 °C concrete test with external supply of alkalis

The expansions with the two methods at the time of assessment are compared in Fig. 5, left, for 18 concretes. Six results come from FE Project 89.214/2008/AP “ASR in concrete road pavements” [11] that was commissioned by the BASt (Federal Highway Research Institute). A comparative evaluation using both methods was carried out on 17 concretes by using the evaluation criterion of 0.5 mm/m after eight cycles of cyclic climate storage with 0.6 molar NaCl solution and the evaluation criterion 0.5 mm/m after ten cycles in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis using 10 % NaCl solution. In this case a different evaluation (light blue marker) would have been obtained for one concrete. This would have been four concretes if the evaluation criterion of 0.6 mm/m after ten cycles had been used in the 60 °C concrete test with 10 % NaCl solution.

Fig. 5, right, compares the results from the 60 °C concrete test with external supply of alkalis with the cyclic climate storage when

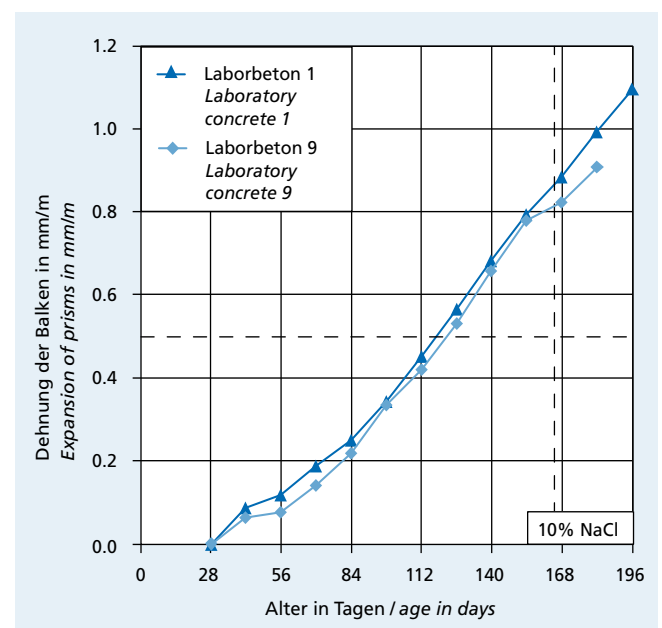
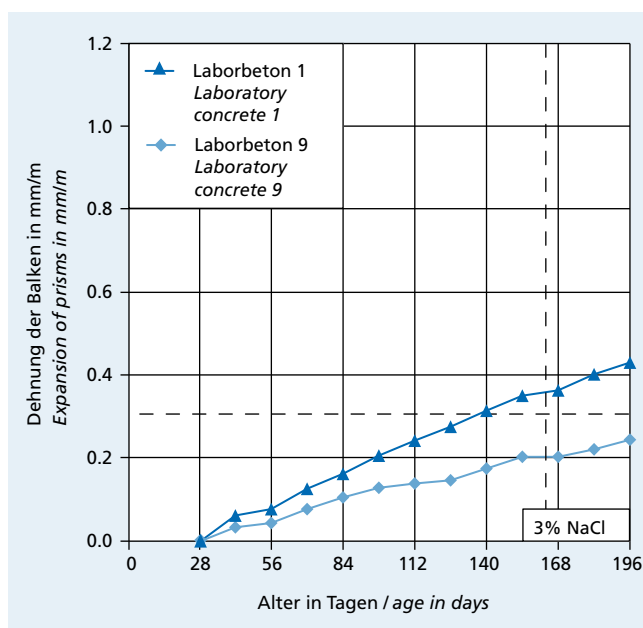


Bild 4: Dehnungen von Betonbalken im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen; links: 3 %ige NaCl-Lösung, rechts: 10 %ige NaCl-Lösung

Figure 4: Expansion of concrete prisms in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis; left: 3 % NaCl solution, right: 10 % NaCl solution

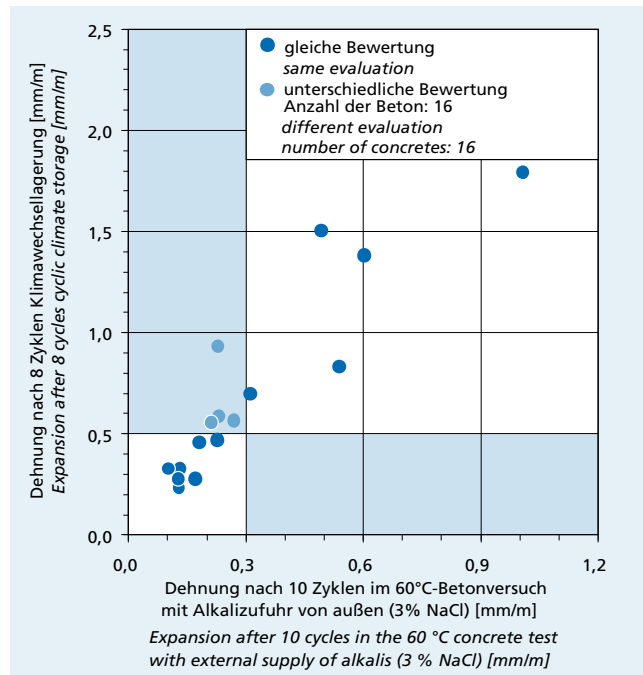
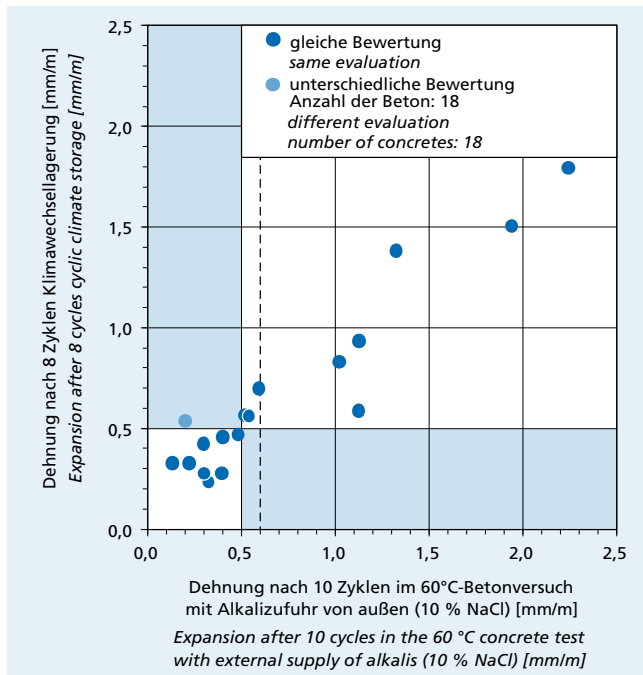


Bild 5: Dehnung verschiedener Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS nach acht Zyklen der Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung (Bewertungskriterium 0,5 mm/m) und Dehnung nach zehn Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr; links: 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung (Bewertungskriterium 0,5 mm/m bzw. 0,60 mm/m), rechts: 60 °C-Betonversuch mit 3 %iger NaCl-Lösung (Bewertungskriterium 0,3 mm/m)

Figure 5: Expansion of different concretes for the WS moisture class after eight cycles of cyclic climate storage with 0.6 molar NaCl solution (evaluation criterion 0.5 mm/m) and expansion after ten cycles in the 60 °C concrete test with supply of alkalis; left: 60 °C concrete test with 10 % NaCl solution (evaluation criterion 0.5 mm/m or 0.60 mm/m), right: 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution (evaluation criterion 0.3 mm/m)

zufuhr untersucht [12]. Der lösliche Chloridgehalt im Zementstein betrug bei bis zu 20 Jahre alten Fahrbahndeckenbetonen im ersten Zentimeter des Betons bis zu 2 M.-% und nahm bis zu einer Tiefe von rd. 5 cm kontinuierlich ab. Bei der Klimawechsellaagerung und beim 60 °C-Betonversuch mit 10 %iger NaCl-Lösung lagen die Chloridgehalte im oberflächennahen Bereich zwischen rd. 3 M.-% und 4 M.-%. Im 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung entsprach der Chloridgehalt in etwa den Gehalten, die in der Oberfläche der Fahrbahndecken ermittelt worden waren. Der 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung bildet die Verhältnisse der untersuchten Fahrbahndeckenbetone ab. Diese Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen der Technischen Universität Hamburg-Harburg überein [13]. Die Anpassung der Prüfung und der Bewertungskriterien im 60 °C-Betonversuch würde damit ggf. die Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse verbessern.

5 Zusammenfassung

In Betonprüfungen mit Alkalizufuhr kann die Alkaliempfindlichkeit von Betonen (AKR-Performance-Prüfung) bzw. Gesteinskörnungen (WS-Grundprüfung) für Fahrbahndecken der Feuchtigkeitsklasse WS bewertet werden. Hierzu wurde an der Bauhaus-Universität Weimar (FIB) und im Forschungsinstitut in Düsseldorf (FIZ) jeweils ein Verfahren entwickelt: Betonversuch mit „Klimawechsellaagerung“ und der „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“. Durch die Anwendung der Verfahren sollen zukünftig zielsicher AKR-Schäden vermieden werden. Durch die Festlegung von Bewertungskriterien müssen daher die Fälle erfasst und zukünftig ausgeschlossen werden, die nachweislich zum Schaden geführt haben. Es muss aber auch weiterhin möglich sein, mit den Betonrezepturen bzw. Gesteinskörnungen zu bauen, die sich in der Praxis nachweislich bewährt haben.

Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, muss die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf Praxisverhältnisse gegeben sein. Um die Übertragbarkeit beurteilen zu können, wurden Bohrkern aus Betonfahrbahndecken und Laborbetone mit dem

60 °C concrete test was carried out with 3 % NaCl solution and 0.3 mm/m was applied as the evaluation criterion. Four of the 16 concretes would have been evaluated differently as four concretes passed the 60 °C concrete test but exhibited expansions above the limit in the cyclic climate storage.

4.5 Chloride profile in the concrete with external supply of alkalis

Fig. 6 shows the water-soluble chloride content in the concrete relative to the content of hardened cement paste in relation to the distance from the surface. The chloride content was examined in drill cores from concrete road pavements and in test specimens after conclusion of the cyclic climate storage (test specimens provided by the F.A. Finger Institute for Building Materials Science – Bauhaus University Weimar) and after the conclusion of the 60 °C concrete test with external supply of alkalis [12]. In concrete road pavements that were up to 20 years old the soluble chloride content in the hardened cement paste in the first centimetre of the concrete was up to 2 mass % and fell continuously to a depth of about 5 cm. With the cyclic climate storage and with the 60 °C concrete test with 10 % NaCl solution the levels of chloride in the area close to the surface lay between about 3 mass % and 4 mass %. In the 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution the chloride content corresponded approximately to the levels that had been measured in the surface of the road pavements, so the 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution simulated the conditions in the concrete road pavements that had been investigated. These results are in agreement with observations by Hamburg-Harburg Technical University [13]. Adjusting the test and the evaluation criteria in the 60 °C concrete test would possibly therefore improve their transferability to practical conditions.

5 Summary

The alkali reactivity of concretes (ASR performance testing) and of aggregates (WS concrete road testing) for road pavements in

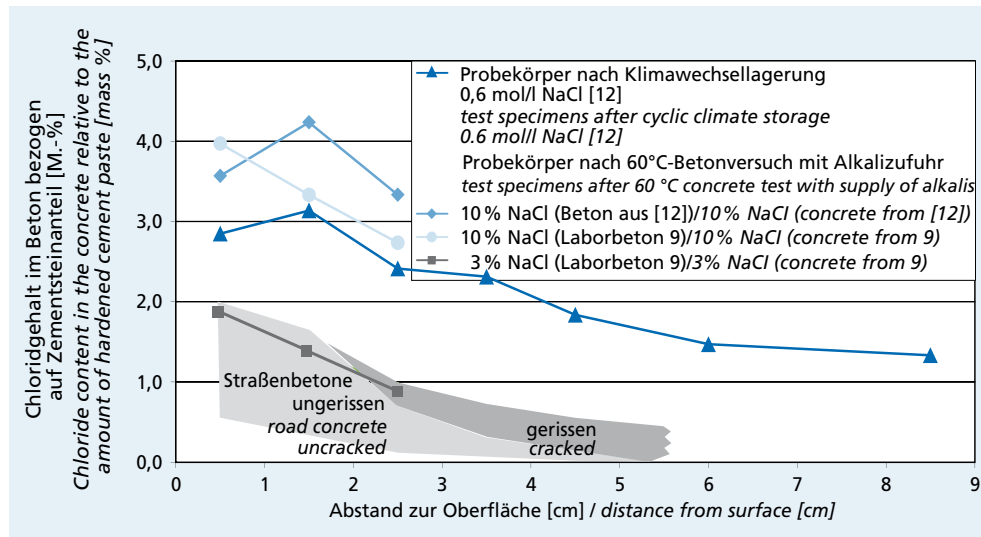


Bild 6: Wasserlösliche Chloridgehalte in Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken und in Laborprüfkörpern nach Abschluss von AKR-Performance-Prüfungen (Klimawechsellagerung und 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen), bezogen auf den Zementsteinanteil [12]

Figure 6: Content of water-soluble chloride in drill cores from concrete road pavements and in laboratory test specimens after conclusion of the ASR performance tests (cyclic climate storage and 60 °C concrete test with external supply of alkalis), relative to the content of hardened cement paste [12]

„60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ untersucht. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

Betone, die im 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung nach zehn Zyklen eine maximale Dehnung von 0,3 mm/m aufwiesen, zeigten in Fahrbahndecken der ersten Fahrspur von Bundesautobahnen nach zehn bis 18 Jahren intensiver Nutzung keine Anzeichen einer schädigenden AKR oder nur leichte Netzrisse, die nicht auf eine AKR zurückzuführen waren. Zum Teil traten Verfärbungen im Bereich der Querfugen/Fugenkreuze auf (kein Schaden bzw. Schadenskategorie I). Bei größeren Dehnungen muss bei Fahrbahndecken der Feuchtigkeitsklasse WS nach neun bis 15 Jahren von Schäden der Schadenskategorie II oder III ausgegangen werden.

Vergleichsprüfungen mit einer 10 %igen NaCl-Lösung im 60 °C-Betonversuch zeigten, dass in den meisten Fällen die Bewertung wie mit einer 3 %igen NaCl-Lösung erzielt wird, wenn ein Bewertungskriterium von 0,6 mm/m nach zehn Zyklen angesetzt werden würde. Mit der 3 %igen NaCl-Lösung und einem Bewertungskriterium der Dehnung von 0,3 mm/m scheint die Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse im Vergleich zur Prüfung mit einer 10 %igen NaCl-Lösung und einem Bewertungskriterium von 0,5 mm/m nach zehn Zyklen (derzeitige Praxis) ggf. verbessert werden zu können. Voraussetzung ist, dass auf Seiten des Bauherrn akzeptiert werden kann, dass in Einzelfällen nach zehn Jahren Nutzungsdauer die Schadenskategorie I erreicht wird.

Mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen“ und der Klimawechsellagerung wurden Betone fast durchgängig vergleichbar bewertet, wenn der 60 °C-Betonversuch mit einer 10 %igen NaCl-Lösung durchgeführt und 0,5 mm/m als Bewertungskriterium angesetzt wurde. Verwendet man den 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung und das Bewertungskriterium der Dehnung von 0,3 mm/m nach zehn Zyklen, verringert sich die Übereinstimmung der Bewertung mit der Klimawechsellagerung.

Beim 60 °C-Betonversuch mit einer 3 %igen NaCl-Lösung entsprach der Chloridgehalt, der nach Abschluss der Prüfung bestimmt wurde, in etwa den Gehalten, die in der Oberfläche von Fahrbahndecken aus Beton gemessen wurden. Die Anpassung des 60 °C-Betonversuchs würde daher die Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Praxisverhältnisse ggf. auch in dieser Hinsicht positiv beeinflussen.

the WS moisture class can be evaluated in concrete tests with external supply of alkalis. The alkali reactivity of concretes (ASR performance testing) and of aggregates (concrete roads WS testing) for initial in the WS moisture class can be evaluated in concrete tests with alkali supply from outside. The Bauhaus University in Weimar (FIB) and the Research Institute in Dusseldorf (FIZ) each developed a procedure for this purpose, namely concrete tests with “cyclic climate storage” and the “60 °C concrete test with external supply of alkalis”. The intention is that in the future it will be possible to avoid ASR damage by applying these procedures. The cases that have verifiably led to damage must therefore be identified and then excluded in fu-

ture by stipulating evaluation criteria. However, it must also continue to be possible to build with concrete mixes and aggregates that have proved successful in practice.

In order to fulfil both requirements it must be possible to transfer the laboratory results to practical conditions. The transferability was assessed by investigating drill cores from concrete road pavements and laboratory concretes with the “60 °C concrete test with external supply of alkalis”. The results can be summarized as follows:

Concretes that exhibited a maximum expansion of 0.3 mm/m after ten cycles in the 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution showed no signs of a harmful ASR after ten to 18 years of intensive use in concrete road pavements in the first traffic lane of federal motorways or only showed slight cracking that was not attributable to an ASR. Discolouration occurred in some cases in the area of transverse joints or joint intersections (no damage or damage category I). With larger expansions it has to be assumed that damage in damage categories II or III will occur in concrete road pavements in the WS moisture class after nine to 15 years.

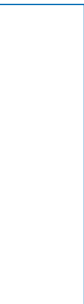
Comparison testing with 10 % NaCl solution in the 60 °C concrete test showed that in most cases the same evaluation as with 3 % NaCl solution is obtained if an evaluation criterion of 0.6 mm/m after ten cycles is applied. With 3 % NaCl solution and an evaluation criterion for the expansion of 0.3 mm/m the transferability to practical conditions seems possibly better than the test with 10 % NaCl solution and an evaluation criterion of 0.5 mm/m after ten cycles (current practice). One precondition is that the client is prepared to accept that damage category I may occur in individual cases after ten years in use.

With the “60 °C concrete test with external supply of alkalis” and the cyclic climate storage the evaluation of the concretes was almost universally comparable when the 60 °C concrete test was carried out with 10 % NaCl solution and 0.5 mm/m was applied as the evaluation criterion. If the 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution with an expansion of 0.3 mm/m after ten cycles as the evaluation criterion was used then agreement of the evaluation with the cyclic climate storage was reduced.

With the 60 °C concrete test with 3 % NaCl solution the chloride content that was determined at the end of the test corresponded approximately to the levels that were measured in the concrete road pavements. Adaptation of the 60 °C concrete test would therefore possibly also have a beneficial effect in this respect on the transferability of the laboratory tests to practically conditions.

Literatur / Literature

- [1] Bonzel, J.: Alkalireaktion unter baupraktischen Bedingungen. Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkali-reaktion im Beton, Vorträge auf einer Veranstaltung des Forschungsinstituts der Zementindustrie am 20. Februar 1973 im Auditorium Maximum der Universität Hamburg, Hamburg. Düsseldorf: Beton-Verl., 1973 (Schriftenreihe der Zementindustrie 40)
- Und: Bonzel, Justus; Dahms, Jürgen: Alkalireaktion im Beton. beton 23 (1973) H. 11, S. 495-500; H. 12, S. 547-554
- [2] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton : Vorläufige Richtlinie – Fassung Februar 1974. beton 24 (1974) H. 5, S. 179-185
- [3] Müller, Ch.: Aktuelle Regelwerke für Beton : Dauerhaftigkeit im Blickpunkt. beton 62 (2012) H. 3, S. 68-75
- [4] Stark, J.; Freyburg, E.; Seyfarth, K.; Giebson, C.; Erfurt, D.: 70 years of ASR with no end in sight? Zement-Kalk-Gips 63 (2010) H. 4, S. 86-95; H. 5, S. 55-70
- [5] Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.; Müller, Ch.; Bokern, J.; Schäfer, E.: AKR-Prüfverfahren: Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz. beton 56 (2006) H. 12, S. 599-604; 57 (2007) H. 1-2, S. 63-71
- [6] Müller, Ch.; Borchers, I.; Eickschen, E.: AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) H. 8, S. 528-538
- [7] Müller, Ch.; Borchers, I.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Giebson, C.: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen - Vergleich von Performance-Prüfverfahren. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung: Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009, S. 2-0261-2-0266
- [8] Borchers, I.; Müller, Ch.: Assessment of the alkali-reactivity potential of specific concrete mixtures to mitigate damaging ASR in concrete structures. Tagungsband fib-workshop: Performance-based Specifications for Concrete (14.-15.06.2011). Leipzig, 2011
- [9] Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton, Fortschreibung April 2012
- [10] Breitenbücher, R.; Sievering, Ch.; Schießl, P.; Wenzl, P.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Siebel, E.; Müller, Ch.; Eickschen, E.; Böhm, M.: Schlussbericht FE-Vorhaben 08.182/2005/LRB: Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton - Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR), Phase I: In-situ Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse. Bochum, Duesseldorf, Weimar, München 2008
- Und: Breitenbücher, R.; Sievering, Ch.; Schießl, P.; Wenzl, P.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Siebel, E.; Müller, Ch.; Eickschen, E.; Böhm, M.: Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton: Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) - Phase 1 In-situ Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2010
- [11] Forschungsinstitut der Zementindustrie; F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde Weimar (Hrsg.): 2. Entwurf des Technischen Schlussberichts AKR im Beton-deckenbau: AKR-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche, Untersuchungen im Rahmen des FE-Vorhabens 89.214/2008/AP. Duesseldorf, Weimar 2010, unveröffentlicht
- [12] Verein Deutscher Zementwerke; Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Hrsg.): Auswirkungen der Alkalizufuhr durch Taumittel auf Bindemittel für Beton mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen: Schlussbericht zu Vorhaben Nr. 15977 N. Duesseldorf, Berlin 2011(IGF-Forschungsvorhaben 15977 N)
- [13] Jehn, C.; Schmidt-Döhl, F.; Franke, L.: Nachträgliche Alkaliaufnahme der Betondecken von Verkehrswegen und der Prüfkörper in Performance-Tests zur Alkalireaktion infolge von Taumittel-Beaufschlagung. beton 62 (2012) H. 10, S. 380-384.



Betontechnische Berichte – Sachverzeichnis 1960 bis 2012

Die Beiträge in Mehrjahresbänden sind jeweils unter dem letzten Jahr aufgeführt.

AASHO Road Test	1961 / 226 1962 / 128	Altbeton	1983 / 17 ff.	Ausbesserungen (Forts.) (auch Instandsetzung)	1970 / 52 f. 1979 / 104 ff.
abgelagerte Zemente	siehe Zementalter	amerikanische Betongüter	1962 / 127 1964 / 141 ff.	Ausblühungen	1960 / 89 f. 1962 / 37 ff.
Abgleichen	1970 / 96 f. 1975 / 67 ff.	amerikanische Zemente	1962 / 131 1964 / 31 1966 / 21 ff.	Ausbreitmaß	1985 / 18 ff. 57 ff. 120 ff. 134 ff. 1997 / 64 ff. 72 ff. 2009 / 71 ff. 93 ff.
Abmessen	1976 / 146 f.	angreifende Wässer und Böden siehe chemische Widerstandsfähigkeit		– bei Estrich	1991 / 25 f. 2009 / 93 ff.
Abnutz widerstand	1961 / 138 1963 / 102 ff. 1968 / 98 1969 / 115 ff. 1972 / 192 1976 / 168 1979 / 77 ff.	Anmachwasser (auch Zugabewasser)	1963 / 153 ff. 1965 / 136 2000 / 49 ff. 2003 / 59 ff.	– Prüftechnik	1985 / 57 ff. 1991 / 43 ff. (siehe auch Konsistenz)
Abschirmbeton	siehe Strahlenschutzbeton	– magnet. Behandlung	1969 / 136 ff.	Ausfallkörnung	1968 / 92 f. 1974 / 163 ff.
Absetzen (Sedimentation)	1960 / 117 1961 / 187 ff. 1964 / 110 1979 / 18 ff. 1997 / 56 f. 2006 / 7 ff.	Annahmekennlinie	1969 / 98 ff.	Ausfallwahrscheinlichkeit	siehe Statistik
Abstandsfaktor	siehe Luftporen-Kennwerte	Ansteifen	1981 / 145 ff. 1983 / 169 ff. 1985 / 117 ff. 131 ff. 1991 / 200	Ausgangskonsistenz	1985 / 120 140 ff. 2009 / 93 ff.
Abwasserbeseitigung	1997 / 99	– Einflussgrößen	1985 / 121 ff. 142 f. 2009 / 93 ff.	Ausgasung	2000 / 123 ff.
Adsorption	2012 / 7 ff.	– Prüfverfahren	1985 / 57 ff. 125 f. 139 ff. (siehe auch Konsistenz)	Ausgleichsfeuchte	1971 / 24 1975 / 107 ff.
Algenbewuchs	1972 / 117 ff.	Anstriche	1962 / 27 ff. 57 f. 1963 / 94 f. 104 1967 / 106 1970 / 51 f. 1974 / 157 ff. 1981 / 51 ff.	Ausgussbeton	1961 / 112 ff. 305 1962 / 145 1971 / 27 99
Alkalireaktion	1963 / 111 ff. 1964 / 116 f. 1973 / 101 ff. 153 ff. 1974 / 71 ff. 1979 / 96 ff. 1988 / 57 ff. 1997 / 109 117 133 145 2003 / 136 f. 145 ff. 191 ff. 2006 / 69 ff. 2012 / 59 ff. 2012 / 69 ff. 2012 / 81 ff.	Arbeitsfugen	1961 / 118 f. 1964 / 33 f.	Auslaugung	1988 / 149 ff. 172 1994 / 93 f. 1997 / 39 f. 2003 / 195
– Prüfverfahren (Labor)	1997 / 112 ff. 177 2006 / 69 ff.	Arbeitslinien	siehe Spannungs-Dehnungs-Linie	Auspressen	1961 / 114 177 ff. 305 1962 / 77 141 143 1964 / 36 104 1970 / 21 ff. 1972 / 51 ff. 1997 / 39 f.
– Schadenanalyse (Bauwerk)	1997 / 110 ff. 133	Arbeitsvermögen	siehe Energieaufnahme	Ausschalfristen	1968 / 99 1972 / 195
		Asbestzement	1976 / 157		
		Atomreaktor	siehe Reaktorbau		
		Auflast beim Rütteln	1960 / 63 f.		
		Ausbesserungen (auch Instandsetzung)	1961 / 267 1962 / 76 1963 / 115 ff. 1969 / 129 ff.		

Autoklav-Versuch	1971 / 79 f.	Beständigkeit	1962 / 191 f. 1963 / 85 ff. 1964 / 175 f. 1966 / 21 ff. 1972 / 33 ff. 1976 / 164 ff. 1979 / 61 ff. 1981 / 141 ff. 1988 / 79 ff. 186 ff. 1991 / 139 f. 162 f. 171 ff. 1997 / 79 2000 / 111 ff. 145 2003 / 19 ff. 55 2006 / 17 ff. 29 ff. 69 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff. 2012 / 69 ff.	Betonförderung	1962 / 177 ff. 1965 / 144 ff.
Baryt	1961 / 101 ff.			Betonformsteine	siehe Formsteine
Barytbeton	1961 / 110 ff. 125			Betongefüge	2000 / 25 ff. 2003 / 121
Baugrund	1962 / 141 ff.			– Prüfung	1994 / 39 f.
Baunormen				Betongüte	1960 / 91 ff. 1961 / 139 273 f. 1962 / 127 1964 / 188 ff. 1967 / 71 f. 1968 / 85 ff. 1969 / 85 ff. 1970 / 165 ff. 1972 / 182 ff. 1979 / 52 1983 / 109 f.
– DIN 1045	1968 / 83 ff. 127 ff. 1969 / 106 ff. 1972 / 173 ff. 2003 / 19 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.			Betonierabschnitte	1961 / 115 ff. 1964 / 33 ff.
– DIN EN 197	2003 / 10			Betonpfähle	1962 / 143 f. 1966 / 41 ff. 1968 / 49 ff.
– DIN 1164	1968 / 21 ff. 1969 / 53 1971 / 55 ff. 1997 / 7 ff. 2003 / 133 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	(siehe auch Abnutzwiderstand, Alkalireaktion, chemische Widerstandsfähigkeit, Dauerfestigkeit, Erosionswiderstand, Feuerbeständigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand, Frostwiderstand, Kavitationswiderstand, Korrosionsschutz)		betonschädliche Wässer	siehe chemische Widerstandsfähigkeit
– DIN 4030	1968 / 96 ff. 127 ff. 1985 / 49	Beständigkeitsfaktor	1962 / 95 ff.	Betonschutz	1967 / 85 ff. 1968 / 139 1970 / 51 f. 1973 / 125 ff. (siehe auch Anstriche, Beschichten, Imprägnieren)
– DIN 4102	1978 / 71 ff.	Beton B I	1972 / 185 ff.	Betonsplittbeton	1983 / 21 ff.
– DIN 4108	1976 / 42 ff.	Beton B II	1972 / 187 f.	Betonsteine	1962 / 69 ff. 1967 / 143 ff.
– DIN 4226	1968 / 91	Betonanwendung		Betonstraßen	1961 / 221 ff. 1962 / 81 1965 / 21 ff. 31 ff. 2000 / 111 2009 / 39 ff. (siehe auch Straßenbeton)
– DIN 18551	1973 / 139 ff.	– Expositionsklassen	2003 / 21 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Betontemperatur	1960 / 35 ff. 1961 / 9 ff. 120 ff. 129 ff. 282 ff. 1962 / 105 ff. 1963 / 37 ff. 153 ff. 170 1964 / 22 ff. 38 ff. 163 f. 1967 / 41 ff. 68 f. 1968 / 146 ff. 1969 / 74 ff. 1970 / 57 ff. 1973 / 85 f. 1974 / 151 ff. 1975 / 17 ff.
– EN 206	2012 / 69 ff.	– Gesundheit	2000 / 123 ff. 135		
– internationale	1979 / 43 ff. (siehe auch Richtlinien und Merkblätter)	– Umwelt	2000 / 111 135		
Behälter	1970 / 58 f. 1971 / 21 f. 1976 / 31 f. 1981 / 18 f. 1991 / 107	Betondeckung	siehe Korrosionsschutz		
Belastungsgeschwindigkeit	1961 / 57 f. 1963 / 74 1964 / 83 1971 / 47 2009 / 57 ff.	– Prüfverfahren	1988 / 101 ff.		
Bergbau	siehe Grubenausbau und Schachtausbau	Betoneigenschaften	1960 / 108 ff. 1967 / 63 ff. 1968 / 85 ff. 1976 / 150 ff. 1997 / 102 2003 / 33 f. 53 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.		
Bergsenkung	1962 / 142 f.	– bei Erschütterungen	1981 / 66 ff.		
Beschichten	1962 / 76 1963 / 118 ff. 1967 / 88 ff. 1969 / 41 ff. 130 ff. 1973 / 125 ff. 1979 / 108 ff.	– bei hohen Temperaturen	1961 / 132 ff.		
Beschleuniger	siehe Zusatzmittel	– bei tiefen Temperaturen	1970 / 60 ff. 1981 / 17 ff.		
		Betonfestigkeitsklassen	siehe Betongüte		

Betontemperatur (Forts.)	1976 / 168 1981 / 17 ff. 141 ff. 159 f. 1983 / 135 f. 187 ff. 1985 / 125 145 f. 1994 / 135 187 ff. 2009 / 57 ff. 71 ff.	Betriebsfestigkeit	1981 / 133 ff.	C ₃ A-Gehalt	1960 / 104 1966 / 34 ff. 1971 / 84 ff. 1981 / 152 ff.
(siehe auch Feuerbeständigkeit und Wärmedehnung)		Bettungsbeton	1960 / 112 ff.	Calciumsilicat	1983 / 63
– Messverfahren	1968 / 154 ff. 1970 / 185 ff. 1994 / 128 f.	Bewuchsbeseitigung	1972 / 117 ff.	Carbonatisierung	1960 / 83 ff. 115 1962 / 48 ff. 1963 / 107 1969 / 58 1972 / 47 125 ff. 1976 / 167 1988 / 21 ff. 87 ff. 186 f. 1991 / 144 f. 181 209 f. 1994 / 173 ff. 1997 / 145 2000 / 21 2006 / 29 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Betonwaren	1964 / 107 111 1965 / 206 ff.	– bei Erschütterungen	1981 / 76 ff.	– Prüfverfahren	1988 / 28 f. 1997 / 148 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.
– Rohre	1994 / 53 ff. 1997 / 99	– bei hohen Temperaturen	1962 / 106 f. 1969 / 31	CEB-Regelwerk	1979 / 50 ff.
Betonzusammensetzung	1960 / 107 ff. 1961 / 137 ff. 1962 / 24 ff. 128 ff. 167 ff. 1963 / 64 ff. 89 ff. 143 ff. 1963 / 165 ff. 1964 / 27 ff. 73 ff. 1965 / 137 ff. 199 f. 1966 / 63 ff. 120 ff. 157 ff. 1967 / 26 f. 74 ff. 1968 / 88 ff. 1970 / 121 ff. 1973 / 144 ff. 1976 / 136 ff. 1983 / 122 ff. 1985 / 123 f. 1988 / 87 ff. 1994 / 158 190 f. 218 ff. 1997 / 64 69 2000 / 43 93 114 f. 2003 / 21 f. 93 157 185 2009 / 7 ff. 57 ff. 71 ff.	Bindemittel	1960 / 102 1962 / 105	chemische Widerstandsfähigkeit	1962 / 25 f. 147 ff. 1963 / 96 ff. 1966 / 33 ff. 1967 / 19 ff. 85 ff. 1968 / 41 ff. 127 ff. 1970 / 33 ff. 1971 / 83 ff. 1975 / 57 ff. 91 ff. 1976 / 166 f. 1978 / 93 ff. 1979 / 71 ff. 1985 / 41 ff. 1994 / 76 f.
		Bingham'sche Flüssigkeit	1972 / 53 1973 / 24 f. 1976 / 126 ff.	– angreifende Wässer und Böden	1960 / 120 f. 1961 / 267 f. 1962 / 147 ff. 1967 / 24 ff. 1968 / 127 ff. 1975 / 57 ff. 91 ff. 1976 / 167 1979 / 72 ff. 1988 / 117 ff. 1994 / 75 139 ff.
		Bioklimatik	1975 / 143 ff. 1978 / 157 ff.	– Ammonium	1994 / 71 ff.
		Blähton	1964 / 143 ff. 1965 / 40 ff.	– Angriffsgrad	1967 / 23 ff. 1968 / 131 ff. 1972 / 191 f. 1988 / 117 f.
		Bodenverfestigung	1961 / 141 ff. 223 ff. 1962 / 63 ff. 1963 / 175 ff. 1973 / 41 ff. 1978 / 17 ff.		
		Böschungsschutz	siehe Uferbefestigung		
		Bohrkerne	1961 / 219 f. 1970 / 95 ff.		
		Brandgase	1970 / 33 ff.		
		Brandschutz	1978 / 71 ff.		
		Brandversuche	1962 / 80		
		Bruchsteinbeton	1960 / 114		
		Bruchverhalten	1970 / 83 ff. 1971 / 33 ff. 164 ff. 1972 / 152 ff. 1974 / 47 ff. 1976 / 153 f. 1977 / 39 ff. 1978 / 31 ff. 1979 / 38 f. 1981 / 24 1991 / 57 ff.		
		Brückenwiderlager	1964 / 53 1968 / 145 ff.		

chemische
Widerstandsfähigkeit (Forts.)

– Angriffsgrad (Forts.)	1994 / 83
– Betonzusammen- setzung	1960 / 120 f. 1961 / 267 f. 1962 / 25 f. 147 f. 1967 / 19 ff. 80 f. 1968 / 41 f. 135 ff. 1972 / 192 f. 1976 / 166 f. 1978 / 97 ff. 1979 / 73 ff. 1994 / 74
– Brandgase	1970 / 33 ff.
– Chlorid-Diffusion	1970 / 37 ff. 1978 / 100 ff.
– Chloridgehalt	2012 / 81 ff.
– Einwirkung chemischer Stoffe (Übersicht)	1963 / 96 ff. 1967 / 108 ff.
– Gase	1967 / 22 f. 86 1968 / 129 1970 / 33 f. 1978 / 100 ff. 1988 / 185 f.
– Kalkgehalt des Zements und Zuschlags	1962 / 147 ff.
– kalklösende Kohlensäure	1962 / 148 ff. 1967 / 27 ff. 1975 / 60 ff. 91 ff. 1976 / 167 1985 / 41 ff. 1988 / 124 ff. 1994 / 72
– Meerwasser	1963 / 102 1966 / 39 ff. 1967 / 31 f. 1968 / 42 ff. 1976 / 167 1978 / 95 ff. 1979 / 73
– Öleinwirkung	1963 / 98 f. 1966 / 172 f. 1967 / 22 1968 / 130
– Prüfung	1994 / 142 ff. 2003 / 172 183 f.
– Puzzolanzusatz	1960 / 104 1964 / 115 f. 1979 / 74
– Salzlösungen	1963 / 97 f. 1976 / 21 f. 1978 / 97 ff.

chemische
Widerstandsfähigkeit (Forts.)

– Salzlösungen (Forts.)	1979 / 72 ff.
– Säureangriff	1962 / 25 ff. 147 ff. 1963 / 97 ff. 1967 / 21 ff. 1968 / 136 1970 / 33 ff. 1975 / 57 ff. 91 ff. 1979 / 75 ff. 1985 / 41 ff. 1988 / 117 ff. 1997 / 103 ff. 2003 / 181 ff.
– Schutz von Beton	1967 / 85 ff. 1968 / 139 1973 / 125 ff. 1988 / 123 1997 / 106
– Sulfatangriff	1966 / 33 ff. 1967 / 22 ff. 1968 / 137 1971 / 83 ff. 1975 / 57 ff. 1976 / 166 f. 1979 / 72 ff. 1991 / 83 ff. 2003 / 169 ff.
– Sulfatwiderstand	2012 / 69 ff.
– Tausalzeinwirkung siehe Frost-Tausalz-Widerstand	
– weiches Wasser	1967 / 22 1968 / 130 1978 / 99 f.
– Zemente mit hohem Sulfatwiderstand	1960 / 104 1962 / 148 ff. 1963 / 102 1964 / 115 f. 1966 / 33 ff. 1967 / 30 f. 1968 / 31 137 1971 / 83 ff. 1979 / 73 1981 / 91 ff. 2003 / 173
Chlorid-Diffusion	1960 / 37 ff. 1978 / 100 ff. 1991 / 142 f. 165 f. 2000 / 145 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Chloridgehalt	1967 / 37 1970 / 37 ff. 1991 / 166
Dachausbildung	1963 / 53 ff.

Dampfhärtung 1961 / 274
(siehe auch Wärmebehandlung)

Dampfmischen	1974 / 151 ff.
Darrversuch	1981 / 36
Daubensilos	1961 / 215 ff.
Dauerfestigkeit	1971 / 28 40 1974 / 175 1976 / 57 ff. 155 f. 1981 / 129 ff. 1988 / 215 ff. (siehe auch Beständigkeit)
Dauerhaftigkeit (siehe auch Beständigkeit)	2012 / 69 ff.
Deckwerk	1962 / 67 ff. 1967 / 143 ff. 1978 / 22 ff.
Dehnung siehe Formänderungen	
dichter Beton	1960 / 116 ff. 1961 / 107 138 f. 207 ff. 268 1962 / 24 f. 1964 / 118 175 1966 / 145 ff. 1967 / 26 f. 76 ff. 1968 / 95 1971 / 157 ff. 1972 / 191 f. 1975 / 112 ff. 1976 / 163 1983 / 148 f. 1988 / 41 ff. 81 ff. 1994 / 63 f. 1997 / 102 f. 2003 / 185 199 2006 / 17 ff. 2009 / 57 ff.
– organische Flüssigkeiten	1991 / 114 1994 / 151 ff. 213 ff.
– Prüfverfahren	1991 / 115 1994 / 57 f. 160
Diffusion	1988 / 43 ff. 127 ff. 1991 / 110 130 f. 164 f. 1994 / 56 ff. 155
Dispergierung	
– Silicastaub	2003 / 127 ff.

Dolomit	1962 / 155 f.	Druckfestigkeit (Forts.)		Eisenerze	1961 / 101 f.
Dreistoffbindemittel	1960 / 102	– bei tiefen Temperaturen	1970 / 61 ff. 1981 / 21 f.	Eisenportlandzement	1971 / 60 f. 1983 / 88
Druckfestigkeit	1960 / 44 ff. 110 ff. 130 ff. 1961 / 27 ff. 205 219 f. 253 ff. 285 ff. 1962 / 83 ff. 123 ff. 170 1963 / 41 ff. 141 ff. 162 1964 / 155 ff. 188 ff. 1965 / 36 f. 106 1966 / 115 ff. 139 ff. 1967 / 55 ff. 65 ff. 1968 / 85 ff. 113 ff. 1969 / 51 ff. 85 ff. 1970 / 100 ff. 165 ff. 1971 / 139 ff. 151 ff. 1972 / 135 ff. 182 ff. 1976 / 62 ff. 137 153 ff. 1981 / 112 f. 1983 / 21 ff. 109 f. 137 ff. 157 ff. 1985 / 103 ff. 1988 / 89 ff. 224 1991 / 140 178 f. 1994 / 43 47 61 82 123 171 f. 187 ff. 225 f. 1997 / 72 ff. 2000 / 18 f. 2009 / 7 ff. 19 ff. 57 ff. 71 ff. 93 ff.	– mehrachsige	1976 / 35 ff. 154	Elastizitätsmodul	1960 / 76 ff. 1961 / 175 f. 212 1964 / 167 ff. 1965 / 54 ff. 107 f. 1967 / 55 ff. 76 1968 / 72 ff. 1970 / 65 ff. 126 f. 139 ff. 1971 / 39 ff. 119 ff. 157 162 ff. 1972 / 156 1974 / 47 f. 1976 / 74 f. 159 f. 1977 / 39 ff. 1978 / 37 ff. 1981 / 22 ff. 120 1983 / 23 ff. 139 f. 1985 / 89 ff. 1988 / 225 1994 / 45 2000 / 21 2009 / 7 ff. 57 ff. 71 ff. 93 ff.
– bei Erschütterungen	1981 / 69 ff.	– Mikrohärte	1983 / 41 ff.	– Bestimmungsverfahren	1970 / 146 ff. 1971 / 119 ff.
– bei hohen Temperaturen	1962 / 106 f. 1969 / 24 ff. 36 1971 / 27 1976 / 34 f.	– Schnellprüfung	1961 / 273 ff.	– Modellvorstellungen	1970 / 152 ff.
		Druckkraftaufnahme	siehe Kraftableitung	elasto-plastischer Stoff	1978 / 34 ff.
		dynamische Beanspruchungen	1981 / 62 ff. 130 ff.	elektrostatische und -magnetische Felder	1975 / 144 ff. 1978 / 157 ff.
		Durchlässigkeit		Energieaufnahme	1974 / 48 ff. 1978 / 32 ff. 1979 / 35 ff. 1981 / 143 1983 / 157 ff. 1985 / 108 ff. 1991 / 57 ff.
		– Prüfverfahren	1988 / 149 ff. 1994 / 219 f.	Enteisungsmittel	1979 / 65 f.
		Eigenfeuchte		Entmischen	1961 / 114 1962 / 180 f. 1974 / 139
		– Beton	1968 / 113 ff. 1970 / 99 ff. 1981 / 27 2009 / 93 ff.	Entsalzungsanlagen	1978 / 93 ff.
		– Gesteinskörnung	1966 / 89 ff. 1974 / 91 ff. 137 1976 / 146	Epoxidharz	1962 / 73 ff. 1963 / 119 f. 1967 / 97 ff.
		Eigenspannungen	1960 / 73 ff. (siehe auch Gefüge-, Schwind- und Temperaturspannungen)	Erddämme	1962 / 64 ff. 1973 / 41 ff.
		Eignungsprüfung	1961 / 290 1962 / 83 1964 / 158 1968 / 100 1970 / 175 f. 1972 / 196 1973 / 149 1981 / 163		
		Einbringen des Betons	1961 / 114 ff. 1962 / 35 1963 / 115 ff. 1964 / 33 ff. 1965 / 147 1966 / 188 f. 1973 / 145 f. 1974 / 139 ff.		
		Eindringen/Flüssigkeiten	1994 / 162 ff. 213 ff.		
		Einheiten-Systeme	1978 / 105 ff.		
		Einpressmörtel	1961 / 177 ff. 1977 / 165 ff.		
		– Prüfverfahren	1961 / 187 1965 / 210 1977 / 172 ff. 1981 / 150 f.		
		Einpressungen	siehe Auspressen		
		Eis (Eigenschaften)	1970 / 60 f.		

Erddämme (Forts.)	1978 / 20 ff.	Festigkeitsentwicklung (Forts.)	1988 / 183 f. 222 f.	Flotationsverfahren	1981 / 40 ff.
Erhärtungsprüfung	1962 / 83 1968 / 99 f. 1971 / 65 ff.		1994 / 188 f. 1997 / 151 2000 / 25 ff. 68 f.	Flugasche	1981 / 47 1983 / 64 ff. 1988 / 176 ff. 1991 / 83 ff. 157 ff.
Erosionswiderstand	1969 / 115 ff.		2003 / 68 159 162		1997 / 58 f. 2003 / 150 f. 171 185
Erschütterungen (siehe auch Schlagfestigkeit)	1981 / 61 ff.		2009 / 7 ff. 57 ff. 71 ff. 93 ff.		2009 / 7 ff. 71 ff.
Erstarren	1961 / 132 193 1964 / 99 ff. 1968 / 28 f. 1971 / 62 ff. 1981 / 145 ff. 1983 / 169 ff. 1985 / 119 ff. 131 ff.	Festigkeitsklassen des Betons siehe Betongüte		Flugaschezement	1983 / 79 ff. 2009 / 7 ff.
– Prüfverfahren	1981 / 147 ff.	Festigkeitsvergleich	1962 / 123 ff.	Flüssiggasbehälter	1970 / 57 ff. 1981 / 18 f.
– Sulfatträger	1981 / 154 ff. 1983 / 173 ff. 1985 / 132 f. 1988 / 200	Festigkeitsverhältnis	1963 / 78 ff. 1964 / 87 ff. 166 1965 / 55 1968 / 71 f. 1970 / 124 ff. 1981 / 114 f. 1991 / 68	Fördern des Betons	1962 / 177 ff. 1965 / 144 ff. 1966 / 188 f. 1972 / 109 194
Estrich	2009 / 93 ff.	Feuchtigkeitseinfluss	1981 / 25 ff. 141 ff. 1988 / 199 f. 220 f. 1994 / 216	Formänderungen	1970 / 65 ff. 1971 / 33 ff. 123 ff. 1974 / 47 ff. 1976 / 158 ff. 1977 / 17 ff. 29 ff. 1978 / 34 ff. 1979 / 38 f. 1981 / 22 ff. 111 ff. 1983 / 158 f. 1985 / 89 ff. 1991 / 57 ff. 1994 / 181 ff. 1997 / 122 ff. 140 2003 / 36 139 174 f. 2009 / 57 ff.
Fallrohrleitungen	1962 / 177 ff.	Feuchtigkeitsgehalt siehe Ausgleichsfeuchte und Eigenfeuchte		(siehe auch Alkalireaktion, Elastizitätsmodul, Frostdehnung, Kriechen, Quellen, Querdehnung, Schwinden, Wärmedehnung)	
Faserbeton	1969 / 78 ff. 1974 / 45 ff. 1976 / 37 f. 157 1978 / 50 ff. 1979 / 29 ff. 1981 / 27 f. 101 ff. 1983 / 155 ff. 1985 / 73 ff.	Feuerbeständigkeit	1962 / 79 ff. 1964 / 176 1965 / 111 1969 / 21 ff. 35 f. 1976 / 168 1978 / 71 ff.	Formsteine	1960 / 25 f. 1961 / 49 ff. 1963 / 173 ff.
Faserverteilung und -orientierung	1985 / 94 ff.	Feuerbeton	1969 / 27 ff.	Formsteinringe	1961 / 72 ff.
Fehlerverteilungskurve	siehe Statistik	Feuerungsbau	1969 / 21 ff. 35 f.	Formstein-Silo	1962 / 31 ff.
Festigkeitsentwicklung	1960 / 29 ff. 1961 / 9 ff. 201 ff. 241 ff. 273 ff. 1963 / 45 f. 69 f. 137 ff. 169 ff. 1964 / 77 ff. 162 ff. 1965 / 132 150 1966 / 115 ff. 1967 / 35 f. 1969 / 67 ff. 1971 / 73 ff. 1973 / 147 f. 1975 / 130 1976 / 57 ff. 107 ff. 155 1977 / 149 ff. 1978 / 43 ff.	Feuerwiderstandsklasse	1978 / 74 ff.	Fraktile	siehe Statistik
		FIP-Kongress 1970	1970 / 133 ff.	Fremdüberwachung	1972 / 197
		Flachdach	1963 / 53 ff.	Frischbeton	2003 / 159 2009 / 71 ff.
		Flechtenbewuchs	1972 / 117 ff.	– Analyse	1977 / 105 ff. 1981 / 33 ff.
		Fließbeton	1974 / 21 ff. 143 ff. 1977 / 87 f. 149 ff. 1983 / 113 ff.	– Recycling	2003 / 59 ff.
		Fließestrich	1991 / 21 ff.	– Temperatur	2003 / 95 f.
		Fließmittel	siehe Zusatzmittel	Frostbeständigkeit	siehe Frostwiderstand
		Fließverhalten von Zementleim	1973 / 26 ff. 1976 / 123 ff.		

Frostdehnung	1960 / 119 1961 / 191 1962 / 164 1976 / 166	Frostwiderstand (Forts.)	1988 / 184 f. 1991 / 146 f. 165 172 f. 206 f. 1994 / 33 ff. 174 2000 / 21 2003 / 55 2006 / 17 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff. (siehe auch Frost-Tausalz-Widerstand)	Gefrierverfahren (Tiefbau)	1962 / 142
Frostschuttschicht	1961 / 223 f.	– Prüfverfahren	2000 / 85 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Gefügeschädigung	1997 / 109 ff. 121 f. 136 f. 2000 / 116 f. 2006 / 17 ff.
Frost-Tausalz-Widerstand	1962 / 150 ff. 1963 / 95 f. 1965 / 73 ff. 161 ff. 185 ff. 1966 / 26 ff. 75 ff. 1967 / 81 1968 / 95 f. 1971 / 115 f. 1972 / 191 f. 1976 / 165 1977 / 55 ff. 157 ff. 1983 / 101 ff. 1991 / 189 208 f. 1994 / 33 ff. 174 1997 / 97 ff. 2000 / 22 2003 / 68 2009 / 7 ff. 39 ff. 71 ff. (siehe auch Frostwiderstand)	Frühfestigkeit	siehe Festigkeitsentwicklung	Gefügespannungen	1960 / 75 ff. 1967 / 53 ff. / 135ff. 1972 2009 / 57 ff. (siehe auch Schwindspannungen und Temperaturspannungen)
– Prüfverfahren	1977 / 60 ff. 1994 / 37 f. 2000 / 85 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	frühhochfester Beton mit Fließmittel	1977 / 149 ff. 1983 / 113 ff.	Gehwegplatten	1965 / 161 ff. 208 f. 1966 / 49
Frost-Tau-Wechsel-Prüfung	1962 / 93 ff. 1963 / 92 f. 1965 / 171 ff. 209 ff. 1976 / 80 ff. 1977 / 60 ff. 1994 / 37 f. 2006 / 17 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Fugen (Massenbeton)	1968 / 170 ff.	Gelporen	siehe Porenraum
Frostwiderstand	1960 / 9 ff. 118 ff. 1961 / 268 f. 1962 / 97 ff. 1963 / 87 ff. 127 1964 / 175 f. 1965 / 185 ff. 1966 / 26 ff. 1967 / 81 1968 / 95 f. 1970 / 89 ff. 1971 / 115 f. 1972 / 38 ff. 191 f. 1976 / 79 ff. 164 f. 1977 / 56 ff. 1979 / 62 ff. 1983 / 30	Fugenabstand	1963 / 56 f. 1964 / 26 f. 37 1968 / 173	Gestaltseinfluss	1961 / 53 ff. 219 f. 294 f. 1962 / 124 ff. 1963 / 75 ff. 1964 / 85 ff. 1971 / 129 ff. 156 1972 / 44 f. 1976 / 62 1991 / 68 f.
		Fugenausbildung	1973 / 132 ff. 1981 / 56 ff.	Gesteinskörnung (bisher „Zuschlag“)	1962 / 155 f. 1963 / 66 88 92 f. 111 ff. 1964 / 75 f. 1965 / 133 ff. 143 199 1966 / 89 ff. 140 1967 / 29 f. 1968 / 69 91 1972 / 175 ff. 1975 / 92 ff. 1976 / 141 ff. 1978 / 138 ff. 1979 / 68 ff. 1983 / 17 ff. 84 ff. 95 ff. 1985 / 42 ff. 122 2012 / 59 ff.
		Füller	1983 / 64 ff. 1988 / 175 ff.	– Alkali-Carbonat-Reaktion	1963 / 111 1979 / 100 ff. 1997 / 145 ff.
		Füllungsgrad	1978 / 60 ff.	– Alkali-Silikat-Reaktion	1963 / 111 1964 / 116 f. 1973 / 101 ff. 153 ff. 1974 / 71 ff. 1976 / 142 1979 / 96 ff.
		Gärfuttersilos	1961 / 215 ff. 1962 / 23 ff.		
		Gasbeton (Porenbeton)	1964 / 111		
		Gasemission von Ausgangsstoffen	2000 / 123 ff.		
		gasdichter Beton	1961 / 107 1962 / 24 f. 1976 / 163 f.		
		– Permeabilität	1988 / 37 ff. 81 ff. 185 f. 1991 / 127 ff. 1994 / 62 96 1997 / 103 2003 / 199		
		– Diffusion	1988 / 43 ff. 1994 / 63		
		– Prüfverfahren	1988 / 38 f. 82 1991 / 130 ff. (siehe auch dichter Beton)		
		Gefrierpunkt	1962 / 161 1970 / 60 f. 1981 / 21 f.		

Gesteinskörnung (bisher „Zuschlag“) (Forts.)		Gipsgehalt	1961 / 265	Hüttenbims	1960 / 127 1965 / 38 ff.
		Gleitbeiwert	1967 / 122 ff.	Hüttensand	1971 / 60 1983 / 64 ff. 2003 / 133 ff. 150 2009 / 7 ff. 71 ff. 2012 / 7 ff.
– Alkali-Silikat-Reaktion (Forts.)	1988 / 58 ff. 1997 / 109 ff. 117 ff. 133 ff. 2006 / 69 ff.	Griffigkeit	1967 / 121 ff. 1979 / 80 ff.		
		Größtkorn	siehe Kornzusammensetzung		
– aus Altbeton	1983 / 17 ff. 2003 / 47 ff.	Grubenausbau	1960 / 26 f. 1961 / 49 ff. 1962 / 82 188 1965 / 129 ff. 1970 / 23 ff.	Hydratation	1960 / 29 f. 109 1961 / 44 201 ff. 1962 / 24 1963 / 47 1966 / 148 1967 / 37 f. 1969 / 67 ff. 1976 / 107 ff. 150 ff. 1981 / 152 ff. 1983 / 63 ff. 173 ff. 1988 / 200 ff. 1994 / 116 f. 2003 / 71 ff. 2006 / 55 ff.
– aus Reststoffen	1994 / 102 2003 / 29 ff.	– Richtlinien	1965 / 155 ff.		
– Ausnutzbarkeit	1983 / 95 ff.	Gründungen	1962 / 142 f.		
– Betonsplitt	1983 / 17 ff.	grüner Beton	1971 / 151 ff. 1973 / 67 ff.		
– Eigenfeuchte	1966 / 89 ff. 1974 / 91 ff. 137 1976 / 146	Güteklassen	siehe Betongüte bzw. Zementnormenfestigkeit		
– Einfluss des Größtkorns	1971 / 139 ff. 1978 / 134 ff.	Güteprüfung	1961 / 273 ff. 1962 / 83 113 1968 / 100 1969 / 93 ff. 1971 / 65 ff. 1972 / 111 f. 195 ff. 1973 / 150 f. 1997 / 21 2003 / 7	Hydratationswärme	1961 / 99 f. 131 1964 / 30 ff. 1968 / 30 1970 / 179 ff. 1971 / 85 ff. 1988 / 221 f. 1994 / 115 ff. 187 ff. 2000 / 61 ff. 73 2003 / 79 160 2009 / 19 ff.
– elastische Eigenschaften	1970 / 151 1983 / 23 ff. 1994 / 207	Haftfestigkeit	1962 / 76 1964 / 118 176 f. 1967 / 66 2000 / 120 f.		
– für Feuerbeton	1969 / 27 35 f.	Haftmittel	1979 / 106	– Messverfahren	1970 / 185 ff. 1971 / 86 1994 / 125 ff.
– Frostwiderstand	1963 / 88 1976 / 79 ff. 142 1979 / 63 ff. 1983 / 30	Haufwerksporigkeit	2000 / 112 ff.		
– kristallwasserhaltige	1971 / 25 ff. 1975 / 21	Härte	1983 / 41 ff.	hydraulische Erhärtung	1983 / 63
– Lagerstätten	1983 / 95 ff. 1997 / 117 ff. 133 ff.	Häufigkeitsverteilung	siehe Statistik	hydraulischer Radius	1961 / 208
– leichte	1960 / 59 127 1964 / 140 f. 150 ff. 1965 / 38 ff. 101 ff. 1967 / 57 1974 / 95 111 ff. 121 ff. 133 ff. 1976 / 143	heißer Zement	1961 / 132 f.	Hydrophobierung	1975 / 118 ff.
		heißes Anmachwasser	1963 / 153 ff.	ideal-elastischer Stoff	1978 / 34 ff.
– Sand	2012 / 59 ff.	Hitzewiderstand	1972 / 192	Imprägnieren	1965 / 73 ff. 181 204 ff.
– schwere	1961 / 101 f. 125 1976 / 142	hochfester Beton	2003 / 157 ff. (siehe auch Ultrahochfester Beton)	Inhibitor	1969 / 64
– Wassergehalt	1975 / 21 ff. 2003 / 50	Hochleistungsbeton		Injektionen	siehe Auspressen
– Zement-Zuschlag-Reaktion	1979 / 99 f.	– Säurewiderstand	2003 / 185 f.	Innenrüttler	1960 / 124 1962 / 87 ff.
		Hochofenzement	1971 / 60 f. 1981 / 91 ff. 1983 / 75 ff. 2003 / 185 2009 / 7 ff. 19 ff. 71 ff.	innere Oberfläche	1961 / 208
				Instandsetzung	siehe Ausbesserungen

ISO-Normung	1979 / 44 ff.	Konsistenz (Forts.)	242 ff. 1962 / 169 f. 181 1963 / 21 ff. 158 ff. 165 1964 / 102 f. 114 156 ff. 207 ff. 1965 / 138 f. 1966 / 28 90 1968 / 94 1971 / 155 ff. 1972 / 108 188 f. 1974 / 21 ff. 144 ff. 1976 / 148 1978 / 122 ff. 1981 / 112 145 ff. 1983 / 113 ff. 1985 / 17 ff. 97 ff. 117 ff. 131 ff. 144 1988 / 175 ff. 1991 / 178 202 f. 1997 / 57 f. 61 72 ff. 2000 / 42 f. 2003 / 66 99 103 119 f. 2006 / 7 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff. 93 ff.	Kornzusammensetzung (Forts.)	1961 / 102 108 f. 139 f. 1962 / 168 1963 / 67 f. 1964 / 29 f. 75 f. 113 ff. 156 1965 / 47 106 134 178 200 ff. 1968 / 92 f. 1970 / 158 f. 1971 / 139 ff. 1972 / 175 ff. 1974 / 163 ff. 1976 / 142 1978 / 134 ff. 1981 / 47 1983 / 62 97 ff. 116 f.
junger Beton	1971 / 151 ff. 1973 / 67 ff.			Körperschalldämmung	1976 / 26 ff.
Kälteschock	1970 / 70 f. 1981 / 24 ff.			Korrosionsschutz	1960 / 83 ff. 114 ff. 1961 / 138 1962 / 108 1963 / 106 ff. 1964 / 119 f. 177 1965 / 110 1966 / 44 ff. 1967 / 36 ff. 1968 / 46 98 1969 / 57 ff. 1970 / 36 ff. 1972 / 47 f. 125 ff. 189 f. 1978 / 100 ff. 1979 / 56 ff. 83 ff.
Kalkfahnen	siehe Ausblühungen			– Chloridgehalt	1970 / 36 f. 1978 / 100 ff. 1979 / 89 ff. 2000 / 145 ff.
Kalkgehalt	1960 / 83 1961 / 44 f. 1962 / 147 ff. 1967 / 27 ff. 1983 / 64 ff.			– Metall in Beton	1979 / 85 ff.
Kalkhydrat	1962 / 105			– Ursachen von Korrosion	1963 / 106 ff. 1969 / 57 ff. 1979 / 84 ff. 1997 / 79 2000 / 145 ff.
Kalkstein	1962 / 155 f. 1983 / 82 ff. 1985 / 43 f. 1991 / 171 ff. 195 f. 2006 / 29 ff. 2009 / 71 ff. 2012 / 7 ff.			Kraftableitung	1967 / 53 ff. 1971 / 35 f. 123 ff. 1972 / 135 ff. 1976 / 152 f. 1978 / 31 ff. 1979 / 34
Kalorimetrie	1970 / 181 ff. 1994 / 125 ff. 2000 / 61 ff.			Krafteinleitung	siehe Lasteinleitung
Kaltwasser-Versuch	1968 / 30 1971 / 80				
Kanaldichtung	1978 / 22				
Kapillarporen	siehe Porenraum				
Kavitationswiderstand	1969 / 115 ff.				
Kelly-Vail-Verfahren	1981 / 36 f.				
keramischer Stabilisator	1969 / 27 f.				
Kernfeuchte	siehe Eigenfeuchte	– Prüfverfahren	1985 / 17 ff. 1991 / 43 ff. 2000 / 44 2003 / 107 f. 2006 / 7 ff.		
Kernreaktor	siehe Reaktorbau				
Kleben	1962 / 77 1963 / 122	– Vorhaltemaß	1985 / 120 144		
Klinkerphasen	1961 / 44 1981 / 152 ff. 1983 / 63 172 2003 / 79 ff.	Konstruktions-Leichtbeton	1964 / 127 ff. 1965 / 35 ff. 99 ff. 1967 / 57 ff. 1974 / 111 ff. 121 ff. 133 ff. 1976 / 143 1991 / 57 ff. (siehe auch Leichtbeton)		
Kochbehandlung	1961 / 274 ff.				
Kochversuch	1968 / 30 1971 / 77 f.				
Kolloidzement	1961 / 177				
Kondenswasser	1962 / 39 ff. 1963 / 54 f.	Kontaktzone	1972 / 145 ff. 1978 / 47 ff. 1979 / 34 1983 / 51 ff.		
Konformität	2012 / 69 ff.	Kornzusammensetzung	1960 / 112		
Konsistenz	1961 / 113				

102	Kriechen	1960 / 80 f. 1964 / 23 169 ff. 1965 / 58 ff. 108 f. 1970 / 67 1971 / 29 1976 / 158 ff. 1977 / 17 ff. 29 ff. 1981 / 122 ff. 1983 / 26 ff. 142 ff. 2003 / 55 2009 / 57 ff.	Leichtbeton (Forts.)		Luftgehalt (LP-Gehalt) (Forts.)
			– Eigenschaften (Forts.)	1967 / 59 ff. 1974 / 123 ff.	1971 / 113 ff. 1972 / 192 1973 / 95 ff. 1976 / 138 1977 / 59 ff. 1979 / 67 f. 1981 / 170 1983 / 136 1994 / 46 f. 1997 / 93 ff. 2003 / 94 99 2009 / 7 ff. 39 ff. 71 ff.
	kritische Beanspruchung	1971 / 40 ff. 1976 / 154	– Eignungsprüfung	1974 / 126 ff.	
	Kühlen des Betons	1964 / 38 ff.	– Erzeugung in den USA	1964 / 132 f.	
	Labormischer	1978 / 57 ff.	– Kraftfluss	1967 / 53 ff. 1971 / 35 f. 123 ff. 1972 / 143 ff.	– Messverfahren
	Lagerungseinfluss	1961 / 27 ff. 134 1962 / 124 ff. 1963 / 69 ff. 1964 / 78 ff. 1965 / 150 1966 / 128 ff. 166 1968 / 120 ff. 1970 / 114 ff. 1975 / 128 ff. 1994 / 119 f. (siehe auch Nachbehandlung)	– Kriechen	1974 / 91 ff.	1962 / 171 1963 / 128 ff.
	Lasteinleitung	1963 / 73 1964 / 63 80 ff. 1971 / 38 123 ff.	– Mischungs Aufbau	1964 / 153 ff. 1965 / 104 ff. 1967 / 61 f. 1974 / 112 ff. 122 ff. 134 ff. 1976 / 139 ff.	1966 / 82 f. 1975 / 51 f. 1977 / 60 ff. 1979 / 68 2009 / 39 ff.
	Lastkollektiv	1981 / 133 ff.	– Normung in den USA	1964 / 140 ff.	Luftporenbildung
	Le-Chatelier-Versuch	1971 / 78 f.	– Schwinden	1974 / 91 ff.	1961 / 245 f. 1962 / 168 1965 / 194 ff. 2009 / 39 ff. 2012 / 19 ff. 2012 / 41 ff.
	Leichtbeton	1960 / 59 ff. 127 ff. 1964 / 107 ff. 127 ff. 1965 / 35 ff. 99 ff. 1967 / 57 ff. 1974 / 111 ff. 121 ff. 133 ff. 1976 / 143 f. (siehe auch Konstruktions-Leichtbeton)	– Spann beton	1964 / 179 f.	Luftporen-Kennwerte
	– Anwendungsgebiete	1964 / 133 ff.	– Wirtschaftlichkeit	1964 / 138 ff.	1960 / 119 f. 1962 / 94 ff. 163 1965 / 191 1966 / 75 ff. 1970 / 89 ff. 1971 / 113 ff. 1975 / 40 ff. 1977 / 58 ff. 1981 / 169 ff. 1994 / 47 1997 / 89 2009 / 7 ff. 39 ff. 71 ff.
	– Bemessung	1964 / 142 177 ff. 1991 / 57 ff.	– Zuschlag	siehe Gesteinskörnung, leichte	– Berechnung
	– Eigenschaften	1960 / 130 ff. 1964 / 160 ff. 1965 / 53 ff. 106 ff.	Leitfähigkeit, elektrische	1994 / 11 ff. 1997 / 84 ff.	1981 / 177 ff.
			Liegezeit	1979 / 19 ff.	– Messverfahren
			Lösungsgeschwindigkeit, spezifisch	1988 / 123 ff. 145 f.	1981 / 173 ff.
			LP-Beton	siehe Frost-Tausalz-Widerstand	Luftschalldämmung
			LP-Zement	1962 / 131 1964 / 106	1976 / 18 ff.
			luftelektrische Felder	1975 / 143 ff. 1978 / 157 ff.	Mahlfeinheit
			Luftgehalt (LP-Gehalt)	1960 / 9 ff. 118 130 1961 / 245 ff. 1962 / 101 ff. 136 159 ff. 1963 / 69 89 f. 127 f. 1964 / 105 ff. 1965 / 73 181 190 ff. 1966 / 27 ff. 76 f. 1968 / 96	1961 / 181 ff. 1968 / 29 1971 / 81 ff. 1976 / 68 116 f. 1983 / 66 ff. 1997 / 75
					Maracaibo-Brücke
					1962 / 143 f. 1964 / 199
					Maßeinheiten
					1978 / 105 ff.
					Massenbeton
					1961 / 89 f. 99 f. 117 ff. 1964 / 21 ff.

Massenbeton (Forts.)	1968 / 145 ff.	Mischen (Forts.)	1985 / 124 144 f.	Normen	siehe Baunormen
Meerwasserbauten	1963 / 102 1966 / 39 ff. 1967 / 31 f. 1968 / 33 ff.	Mischergröße	1978 / 63 ff.	Normenfestigkeit	siehe Zementnormenfestigkeit
Meerwasserent- salzungsanlagen	1978 / 93 ff.	Mischungsentwurf	siehe Betonzusammensetzung bzw. Stoffraumrech- nung	Normenmörtel	1962 / 132 1968 / 25 1969 / 53 1971 / 65 ff.
Mehlkorn	1960 / 101 ff. 1964 / 113 ff. 1968 / 94 1972 / 113 ff. 181 f. 1973 / 87 f. 1975 / 116 1983 / 97 ff. 1988 / 175 ff. 1997 / 58 f. (siehe auch Kornzusammensetzung)	Mischzeit	1963 / 61 ff. 1964 / 159 1976 / 147 1981 / 160 f. 1985 / 144 f. 2003 / 94 99 2009 / 39 ff.	Oberflächenbehandlung	1961 / 267 1963 / 94 f. 103 ff. 1967 / 99 ff. 1973 / 127 f. 1974 / 158 f. 1981 / 52 f. (siehe auch Anstriche, Beschichten, Imprägnieren)
Merkblätter (siehe auch Richtlinien)		Model Code	1979 / 52 ff.	Oberflächenfeuchte	siehe Eigenfeuchte
– Anstriche	1974 / 157 ff.	NA-Zement	1973 / 110 ff. 161 ff. 1974 / 76 ff. 1997 / 118 2003 / 133 ff.	Oberflächentextur	1967 / 121 ff.
– Anstriche auf Beton von Wasser-Sammel- anlagen	1981 / 51 ff.	Nachbehandlung	1960 / 23 f. 1961 / 124 1962 / 35 60 124 ff. 1963 / 69 ff. 103 f. 122 1964 / 78 159 f. 1965 / 150 f. 204 1966 / 128 ff. 166 1968 / 113 ff. 1970 / 99 ff. 1973 / 90 f. 1974 / 141 1976 / 149 1988 / 84 f. 1991 / 129 209 (siehe auch Oberflächenbehandlung)	Ocratieren	1962 / 29 1967 / 99
– Bodenverfestigung im Wasserbau	1978 / 17 ff.			Ökobilanz	2000 / 141 f.
– Dampfmischen	1974 / 151 ff.			Öleinwirkung	1963 / 98 f. 1966 / 169 ff. 1967 / 22 1968 / 130
– Deckwerksteine	1967 / 143 ff.			Passivierung	1969 / 60 1972 / 127
– Hydratationswärme	1970 / 179 ff.			Permeabilität	1988 / 37 ff. 81 ff. 1994 / 62 105 177
– Leichtbeton und Stahlleichtbeton I	1974 / 111 ff.			Pfähle	siehe Betonpfähle
– Leichtbeton und Stahlleichtbeton II	1974 / 121 ff.			Pfahlgründung	1962 / 143
– Leichtbeton und Stahlleichtbeton III	1974 / 133 ff.			pH-Wert	1960 / 86 1962 / 147 ff. 1967 / 36 1969 / 57 1972 / 126 f.
– Öleinwirkungen	1966 / 169 ff.	Nacherhärtung	siehe Festigkeitsentwicklung	Phasenneubildungen	1988 / 207 ff. 218 227 1994 / 82
– Schutzüberzüge	1973 / 125 ff.	Nachhaltigkeit	2003 / 29 ff.	Pilzbewuchs	1972 / 117 ff.
– Spaltenböden	1966 / 69 ff.	Nachmischen	1963 / 38 44 1979 / 23 f.	Polymerbeton	1976 / 164
– Wärmebehandlung	1967 / 35 ff.	Nachverdichten	1960 / 117 125 1961 / 262 1971 / 109 ff. 1981 / 66 ff.	Porenraum	1960 / 109 ff. 1961 / 201 ff. 1962 / 24 161 ff. 1963 / 87 1965 / 190 1966 / 148 1967 / 77 1969 / 68 ff. 1975 / 106 ff.
– Zementeinpressungen	1970 / 21 ff.	Neutronenstreuung	1981 / 36		
MgO-Gehalt	1971 / 80	Newtonsches Fließgesetz	1972 / 53 1973 / 23 ff. 1976 / 124 ff.		
Mikrohärteprüfung	1983 / 41 ff.	Normalverteilung	siehe Statistik		
Mischbinder	1960 / 103				
Mischen	1963 / 35 44 ff. 1972 / 194 1974 / 151 ff. 1976 / 147 f. 1978 / 57 ff. 1981 / 63 f.				

Porenraum (Forts.)	1976 / 109 ff.	Puzzolanzusatz	1960 / 101 ff.	Rheologie von (Forts.)	115
	150		1964 / 31 f.		Zementleim und 126 f.
	1983 / 47		113 ff.		Frischbeton 2006 / 7 ff.
	66		1979 / 74		2012 / 7 ff.
	1988 / 53 f.		2003 / 150		
	79	PVC-Brände	1970 / 33 ff.	Richtlinien	(siehe auch Merkblätter)
	1991 / 127 ff.			– Alkalireaktion	1974 / 71 ff.
	1994 / 63	Qualitätsmanagement	1997 / 21		2006 / 69 ff.
	2003 / 200				2012 / 59 ff.
	2006 / 17 ff.	Quarzsand	1983 / 84 ff.	– Fließbeton	1974 / 143 ff.
	2009 / 7 ff.			– Gärfuttersilos	1962 / 33 ff.
	19 ff.	Quellen	1964 / 111 f.	– Grubenausbau	1965 / 155 ff.
	71 ff.		1971 / 80	– Spritzbeton	1966 / 177 ff.
			2000 / 93 ff.	– Wirksamkeitsprüfung	1975 / 47 ff.
Porenwasser	1981 / 21 ff.	Quellzement	1964 / 109 ff.	von Zusatzmitteln	
	1994 / 101		1965 / 21 f.		
	1997 / 39		1976 / 140		
	2003 / 81	Querdehnung	1964 / 169	RILEM-Empfehlungen	1979 / 48 ff.
	148		1968 / 73 ff.		
	2009 / 19 ff.		1971 / 39 ff.	Risse	1960 / 23
Portlandzementklinker	1961 / 44		123 ff.		79
	1971 / 60		1972 / 151 ff.		1961 / 99
	1981 / 152 ff.		1978 / 49 f.		133 f.
	1983 / 63 ff.		1979 / 39		1963 / 106
	172		1985 / 110 f.		1964 / 21 ff.
	2009 / 7 ff.	radioaktive Strahlen	1961 / 96		1966 / 44 ff.
	71 ff.				1968 / 161 ff.
	93 ff.	Rammpfähle	siehe Betonpfähle		1970 / 83 ff.
Portlandkalksteinzement	2000 / 15 ff.	RAM-Verfahren	1981 / 38 ff.		1971 / 40 ff.
	2003 / 174				1972 / 137 ff.
	2006 / 29 ff.	Raumbeständigkeit	1962 / 153		1973 / 67 ff.
	2009 / 19 ff.		1968 / 30		1976 / 161 f.
	71 ff.		1971 / 76 ff.		1978 / 45 ff.
	93 ff.	Raumgewicht	siehe Rohdichte		1979 / 13 ff.
Portlandkompositzemente	2006 / 29 ff.	Reaktorbeton	siehe Strahlenschutzbeton		1988 / 202 f.
	2009 / 7 ff.				1988 / 217
	71 ff.	Recycling	1988 / 144		226
	93 ff.		159 ff.		1994 / 181 ff.
Probenzahl	siehe Statistik				1997 / 109 ff.
Prüfung von Baustoffen			1994 / 102 f.		136 f.
– AKR-Performance-Prüfung			2003 / 29 ff.		2000 / 61 ff.
	2012 / 81 ff.		47 ff.		73 ff.
– Konformitätsprüfung			2006 / 55 ff.		93
		Regelkonsistenz	1985 / 120		2003 / 165
					2009 / 57 ff.
		Reife	1961 / 10 ff.	Rissüberbrückung	1962 / 77
			1963 / 172		1963 / 121
– Performance-Prüfverfahren		Relaxation	1971 / 169 ff.		
	2012 / 69 ff.		2000 / 65 f.	Rohdichte	1960 / 62 f.
– Prüfkörperabmessungen		Restfestigkeit	1981 / 26 f.		127 ff.
	siehe Gestaltseinfluss				1961 / 106 f.
– Prüfmaschinen-		Restwasser	2000 / 49 ff.		1964 / 155
Umstellung	1978 / 116 ff.		2003 / 59 ff.		160 ff.
– Prüfstellen		Rheologie von	1973 / 21 ff.		208 f.
	1972 / 197 f.	Zementleim und	1974 / 24 ff.		1965 / 36 f.
	1997 / 21	Frischbeton	1976 / 123 ff.		106
– WS-Grundprüfung	2012 / 81 ff.		1985 / 132 ff.		1971 / 24 f.
Pumpbeton	siehe Fördern des Betons		1997 / 33		1976 / 139
			45	Rohrinnenkühlung	1964 / 41 ff.
Puzzolan	1964 / 113		61 ff.	Rostschutz	siehe Korrosionsschutz
	1983 / 64		2000 / 39 ff.		
			2003 / 104	Rüttelflasche	1960 / 124
					1962 / 87 ff.

Rütteltisch	1960 / 60 65 ff.	Schwinden (Forts.)	1969 / 24 f. 35 f. 1970 / 127 ff. 1971 / 169 1976 / 161 1977 / 42 1983 / 27 ff. 140 ff. 1994 / 186 2000 / 93 ff. 2003 / 55 68 159 2009 / 19 ff. 57 ff.	Spaltzugfestigkeit (Forts.)	166 f. 1970 / 103 ff. 1981 / 114 1983 / 137 ff. 158 1985 / 108 2009 / 57 ff.
Säureangriff	siehe chem. Widerstandsfähigkeit			– Einflussgrößen	1964 / 73 ff.
Schachtausbau	1960 / 25 1962 / 81 177 ff. 1963 / 173 f. 1970 / 23 ff.			– Prüfverfahren	1964 / 66 f. 80 ff.
Schadstoffe, organische	1994 / 106 2000 / 123 ff.			– bei tiefen Temperaturen	1970 / 62 ff.
Schalenrisse	1961 / 99 1964 / 24 1968 / 161 f.	Schwindspannungen	1960 / 73 ff. 1961 / 134 237 ff. 2009 / 57 ff.	Spannbetonstraße	1961 / 232 1965 / 21 ff.
Schallschutz	1976 / 17 ff.			Spannungs-Dehnungs- Linien	1974 / 48 1978 / 37 ff. 1979 / 38 1981 / 22 ff. 1983 / 158 f. 1985 / 108 ff. 1991 / 57 ff. 1994 / 188 f.
Schalung	1962 / 30 55 f.	Schwingungen	1981 / 62 ff. 130 ff.		
Schaumbeton	1964 / 108	Selbstverdichtender Beton	2000 / 39 ff. 2003 / 103 ff. 113 ff. 2006 / 7 ff.	Spannungsrissskorrosion	1969 / 58 f.
Scheinfugen (Massenbeton)	1968 / 171			Spannungsverteilung	1970 / 83 ff. 1972 / 135 ff. 1981 / 138 ff. 2009 / 57 ff.
Schieferton	1964 / 143 ff.	– Prüfung	2003 / 106 f. 115	spezifische Oberfläche	siehe Mahlfineinheit
Schildvortrieb	1962 / 145	– Zusammensetzung	2003 / 122	Spritzbeton	1966 / 177 ff. 1971 / 99 1973 / 139 ff. 1983 / 155 ff. 1994 / 183
Schlagfestigkeit	1962 / 144 1968 / 49 ff. 1979 / 36 ff. 1981 / 101 ff. 1983 / 158	Sekundärstoff	1988 / 143 ff. 159 ff.	Spritzmörtel	1963 / 119 ff. 1966 / 177 ff.
Schlammverfestigung mit Zement	1979 / 113 ff.	Setzmaß (Slump)	1985 / 18 ff. (siehe auch Konsistenz)	Spundwände	1962 / 72
Schnellprüfverfahren	1981 / 34 ff.	Sieblinien	1961 / 139 f. 1968 / 92 f. 1972 / 176 ff. 1976 / 141 1983 / 105 ff. (siehe auch Kornzusammensetzung)	Stahlfaserbeton	1985 / 73 ff.
Schnellzement	1976 / 119 f. 140			Stahlfaserspritzbeton	1983 / 155 ff.
Schrumpfen	1961 / 133 1973 / 67 ff. 1976 / 161 f. 1979 / 13 ff. 1983 / 99 ff. 2009 / 57 ff.	SI-Einheiten	1978 / 105 ff.	Stahlleichtbeton	siehe Konstruktions-Leichtbeton
Schubfestigkeit	1964 / 167 1965 / 110	Silicastaub	2003 / 125 ff. 152 185 2009 / 57 ff.	Standardabweichung	siehe Statistik
Schutzüberzüge	siehe Betonschutz	Silos	1961 / 215 ff. 1962 / 23 ff. 33	Standspuren	1962 / 166
– Merkblatt	1973 / 125 ff.	Sinterbims	1965 / 39 ff.	Startbahnen	1961 / 231 2012 / 81 ff.
Schwermetalle	1988 / 143 ff. 173 f.	Sorption	2012 / 7 ff.	Statistik	1960 / 91 ff. 1964 / 188 ff. 1969 / 85 ff. 1997 / 25 f.
Schwinden	1960 / 73 ff. 134 1961 / 235 ff. 1963 / 24 1964 / 172 f. 1965 / 56 ff. 108 f. 1967 / 40 f.	Spaltenböden	1966 / 57 ff. 69 ff.	Stauraumdichtung	1962 / 63 ff. 141 1973 / 41 ff.
		Spaltrisse	1961 / 99 1964 / 25 f. 1968 / 146 ff.		
		Spaltzugfestigkeit	1963 / 61 f. 79 f. 1964 / 59 ff.		

Steife	siehe Konsistenz	Temperaturbeanspruchungen	1970 / 57 ff. 1981 / 19 ff. 141 ff. (siehe auch Frostdehnung und Wärmedehnung)	Überdeckung	siehe Korrosionsschutz
Stoffraumrechnung	1960 / 109 f. 1961 / 105 ff. 1963 / 130 ff. 1965 / 139 f. 1976 / 137	Temperatureinfluss	siehe Betontemperatur	Uferbefestigung	1962 / 63 ff. 67 ff. 1967 / 143 ff. 1968 / 33 ff. 1971 / 89 ff. 1978 / 20 ff.
Strahlenschutzbeton	1961 / 91 ff. 299 ff. 1964 / 47 ff. 1971 / 21 ff. 1975 / 17 ff. 1976 / 31 ff. 168	Temperaturspannungen	1961 / 99 120 134 211 1962 / 107 161 1964 / 22 ff. 1967 / 39 f. 47 1968 / 146 ff. 1970 / 82 ff. 1973 / 72 ff. 1981 / 25 ff. 141 ff. 1994 / 187 f. (siehe auch Wärmedehnung)	Ultrahochfester Beton	2009 / 57 ff.
– Zusätze	1961 / 105	Tetrapoden	1962 / 72	Ultraschall-Prüfung	1994 / 39
Straßenbau	1961 / 221 ff. 2000 / 93 111	Ton(schiefer)	1964 / 143 ff.	Umrechnung von Festigkeiten	siehe Festigkeitsvergleich und Festigkeitsverhältnis
– hydraulisch geb. Tragschicht	1988 / 155 159 ff. 1944 / 11 ff. 102 ff.	Tragverhalten	1972 / 135 ff. 1978 / 31 ff. 1981 / 138 ff.	Umweltschutz	1988 / 143 ff. 159 ff. 1991 / 107 ff. 1994 / 53 ff. 89 ff. 151 ff. 213 ff. 2000 / 135 ff.
Straßenbeton	1960 / 23 1961 / 226 f. 1962 / 127 159 ff. 1965 / 25 ff. 73 ff. 162 f. 201 ff. 1966 / 26 ff. 75 ff. 1967 / 121 ff. 1973 / 73 ff. 1977 / 149 ff. 1979 / 81 f. 2000 / 93 ff. 2003 / 87 ff. 2009 / 39 ff. 2012 / 81 ff.	Transportbeton	1962 / 9 ff. 109 ff. 117 1963 / 21 ff. 1964 / 219 ff. 1965 / 113 ff. 144 1968 / 90 1972 / 188 1974 / 138 f. 1985 / 124 f. 2003 / 103 ff.	Unterwasserbeton	1966 / 187 ff. 1972 / 192
– Dränbeton	2000 / 111 ff.	Trass	1960 / 101 ff. 1971 / 60 f. 1983 / 64 ff.	Vakuumbeton	1976 / 139
Streckenausbau	siehe Grubenausbau	Trasszement	1960 / 102 1971 / 60 ff. 1983 / 77 ff.	Variationskoeffizient	siehe Statistik
Suevit-Trass-Zement	1960 / 102	Trasszusatz	1960 / 101 ff.	Vebe-Zeit	1985 / 18 ff. (siehe auch Konsistenz)
Sulfat	2012 / 7 ff.	Treiben	1962 / 153 1968 / 30 1971 / 80 ff.	Verankerungskörper	1964 / 53
Sulfatträger	siehe Erstarren	Trinkwasserbehälter	2003 / 191 ff.	Verarbeitbarkeit	siehe Konsistenz
Sulfatwiderstand	siehe chemische Widerstandsfähigkeit	Trittschalldämmung	1976 / 26 f.	Verdichten	1960 / 59 ff. 65 ff. 122 ff. 1962 / 83 ff. 1964 / 159 207 ff. 1965 / 148 ff. 1971 / 155 ff. 1976 / 149
Synchrotronbau	1961 / 301	Trockendocks	1962 / 144	Verdichtungsmaß	1964 / 207 ff. 1985 / 18 ff. 2009 / 71 ff. (siehe auch Konsistenz)
Tausalz	1962 / 161 ff. 1965 / 189 f.	Trocknungsrisse	1973 / 76 ff.	Verflüssiger	siehe Zusatzmittel
Tausalzwiderstand	siehe Frost-Tausalz-Widerstand	Tunnelbau	1962 / 145 1964 / 51 f. 1994 / 181 ff. 2000 / 73 ff.	Verformungen	siehe Formänderungen
Tauwasser	siehe Kondenswasser			Verformungscharakteristik	1970 / 65 ff. 1974 / 48 ff. 1978 / 34 ff. 1979 / 38 1981 / 22 ff. 1983 / 156 ff. 1991 / 57 ff. 1971 / 46 f. (siehe auch Belastungsgeschwindigkeit)
Tellermischer	1978 / 60			Verpressen	siehe Auspressen
				Verschleißwiderstand	siehe Abnutzwiderstand

Verzinkung	1969 / 63 1979 / 86	Wassergehalt (Forts.)	1966 / 90 1971 / 155 ff. 1973 / 87 ff. 1974 / 153 1975 / 17 ff. 107 ff. 1976 / 138 ff. 1978 / 121 ff. (siehe auch Betonzusammensetzung und Konsistenz)	Zement	
Verzögerer	siehe Zusatzmittel	– Prüfung	1977 / 106 ff. 1981 / 36 f.	– Alter	1961 / 190 196
Wärmebehandlung	1960 / 29 ff. 1961 / 273 ff. 1963 / 169 ff. 1964 / 163 ff. 1967 / 35 ff. 51 f. 1988 / 199 ff. 215 ff.	Wasserrückhalte- vermögen	1973 / 67 ff. 1979 / 16 ff.	– Alkaligehalt	1997 / 128 138 145 2003 / 133 ff.
Wärmedämmung	siehe Wärmeschutz	Wasserstoffversprödung	1969 / 59	– amerikanischer	1962 / 131 1964 / 31 1966 / 21 ff.
Wärmedehnung	1960 / 132 f. 1961 / 210 f. 1962 / 106 f. 1964 / 174 1967 / 38 f. 1969 / 24 f. 35 f. 1970 / 67 1976 / 162	Wasserundurchlässigkeit	siehe dichter Beton	– Auswahl	1962 / 105 1963 / 102 1964 / 32 1965 / 132 1966 / 21 ff. 125 ff. 161 ff. 1967 / 30 f. 1978 / 147 ff. 1981 / 91 ff. 164 2009 / 19 ff.
Wärmeentwicklung	siehe Hydratationswärme	Wasserzementwert	siehe Betonzusammensetzung	– Bestandteile	1983 / 61 ff. 172 1988 / 68 f. 1994 / 21 f. 81 1997 / 10 ff. 2003 / 13 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Wärmeleitfähigkeit	1960 / 134 f. 1964 / 32 f. 174 1965 / 110 f. 1970 / 68 ff. 1974 / 125 1976 / 44 ff.	– Prüfung	1977 / 107 ff. 1981 / 35 ff.	– Eigenschaften	1997 / 13 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Wärmeschutz	1963 / 54 ff. 1976 / 39 ff. (siehe auch Wärmeleitfähigkeit)	– wirksamer	1961 / 200 ff. 1962 / 136 170 1974 / 124	– Erstarrungsverhalten	1981 / 145 ff. 1983 / 169 ff. 1985 / 121 f. 131 ff. (siehe auch Erstarren)
Wasseranspruch	1965 / 135 ff. 1972 / 113 ff. 1978 / 121 ff. 1991 / 200 2009 / 71 ff.	Wasserzementwert- Gesetz	1960 / 111 1962 / 129 f. 1963 / 64 f. 1964 / 73 f. 1965 / 140 1966 / 133 ff. 1967 / 67 1969 / 51 ff. 1970 / 165 ff. 1971 / 74 144 f. 1972 / 166 1976 / 137 1988 / 87 ff.	– Füller	1983 / 64 ff.
Wasseraufnahme	1960 / 116 1964 / 154 174 ff. 1965 / 180 f. 1975 / 113 ff. 1988 / 220 1991 / 206 1994 / 61 2006 / 17 ff.	Wasserzementwert- Tafeln	1972 / 165 ff.	– Granulometrie	1983 / 61 ff. 2000 / 25 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Wasserbau	1961 / 267 ff.	Wegebau	1961 / 227 ff.	– heißer	1961 / 132 f.
Wasserbindung	1960 / 108 f. 1961 / 204 1962 / 105 1971 / 24 1975 / 19 ff. 1991 / 200 f.	Widerlager	1964 / 53 1968 / 145 ff.	– Optimierung	1985 / 117 131 147 2009 / 7 ff. 71 ff.
Wasserdampfdiffusion	1975 / 112 f.	Winterbau	1963 / 153 1968 / 99	– Portlandkalksteinzement	2012 / 69 ff.
Wassergehalt	1962 / 169 f. 181 1964 / 156 ff. 208 ff. 1965 / 139	Witterungsbeständigkeit	1972 / 33 ff. 1976 / 164 f. 1981 / 141 ff.	– Prüfverfahren	1971 / 57 ff. 1997 / 22 f.
		Wöhlerlinie	1981 / 130 ff.	– Reaktivität	2000 / 25 ff.
		Zeitfestigkeit	1981 / 135 f.	– Sulfatgehalt	1971 / 80 f.

Zement (Forts.)		Zement-Flugasche-Gemische	2003 / 171 174	– Erhärtungs- geschwindigkeit	1969 / 74 ff. 1976 / 114 ff. 1994 / 117
	– Sulfatgehalt		2009 / 7 ff.		
– Sulfatträger	1981 / 155 f. 1988 / 205	Zementeinbindung	1988 / 143 ff. 172 f. 1994 / 89 ff.	– Faserzusatz	1969 / 78 ff. 1974 / 45 ff. 1979 / 31 ff.
	1981 / 154 ff. 1983 / 171 ff. 1985 / 132 f. 1988 / 212	Zementinjektionen	siehe Auspressen	– Festigkeitsbildung	1961 / 201 ff. 1969 / 67 ff. 1976 / 108 ff. 1978 / 43 ff. 1981 / 154 ff.
– Temperatur	1961 / 132 f.	Zementklinker	1961 / 44 1971 / 60 1981 / 152 ff. 1983 / 63 ff. 172 2003 / 74	– Festigkeitssteigerung	1969 / 135 ff. durch elektr. Verfahren
– Zementklinker	2012 / 69 ff.			– Formänderungen	1978 / 42 ff. 2009 / 19 ff. 57 ff.
– Zumahlstoffe	1983 / 82 ff. 1991 / 174 f. 194 f. 2003 / 133 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Zementleim	1961 / 200 1963 / 46 ff. 1985 / 132 ff. 1997 / 33 69 2009 / 19 ff. 2012 / 7 ff.	– Frosteinwirkung	1963 / 87 f. 1979 / 62 f.
Zementanwendung	2003 / 12 23 f. 2009 / 93 ff.	– Scherwiderstand	1997 / 51 ff. 2003 / 7 ff. 133 ff. (siehe auch Rheologie von Zementleim und Frischbeton sowie Zementsuspension)	– Gefüge	1983 / 61 ff. 170 ff. 1988 / 53 81 f. 149 f. 202 f. 1991 / 107 ff. 1997 / 39 f.
Zementarten	1971 / 61 ff. 1976 / 140 1981 / 91 ff. 1983 / 72 ff. 1991 / 171 ff. 193 ff. 1994 / 164 1997 / 8 f. 27 2000 / 12 15 2003 / 13 f. 133 ff. 2006 / 29 ff. 2009 / 7 ff. 19 ff. 71 ff. (siehe auch Kolloidzement, LP-Zement, NA-Ze- ment, Quellzement, Schnellzement, Suevit-Trass- Zement, Trasszement, Zementklinker sowie – un- ter chem. Widerstandsfähigkeit – Zemente mit hohem Sulfatwiderstand)	Zementnorm	1968 / 21 ff. 1971 / 55 ff. 1976 / 139 f. 1997 / 7 ff. 2000 / 7 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	– Korrosion	2003 / 192 f.
		Zementnormenfestigkeit	1960 / 111 1962 / 123 ff. 1963 / 146 1965 / 132 1966 / 125 f. 1967 / 70 f. 1968 / 25 ff. 1969 / 51 ff. 1970 / 165 ff. 1971 / 69 ff. 1997 / 13 f. 69 2003 / 10 2009 / 7 ff. 71 ff.	– Schichtdicke	1967 / 69 1968 / 68
Zementeigenschaften	2003 / 11			– bei hohen Temperaturen	1969 / 28 ff. 35 1975 / 23 ff.
Zementgehalt	1960 / 114 f. 1961 / 139 1963 / 146 ff. 1964 / 29 f. 74 f. 161 f. 1966 / 34 ff. 1968 / 88 f. 1971 / 73 142 f. 155 1978 / 143 ff. 1994 / 196 f. 2009 / 7 ff. 71 ff. (siehe auch Betonzusammensetzung)	Zementstein	1960 / 108 ff. 1961 / 199 ff. 1963 / 87 f. 1967 / 37 f. 66 ff. 1969 / 67 ff. 1976 / 107 ff. 150 f. 1983 / 61 ff. 1994 / 80 96 f. 1997 / 39 f. 2009 / 19 ff.	– Tragverhalten	1978 / 42 ff.
				– Wassergehalt	1975 / 19 ff. 107 ff.
– Prüfung	1977 / 106 ff. 1981 / 37 ff. 1994 / 11 ff.			– Wassertransport	1975 / 109 ff.
Zementgemische	1961 / 271 f. 1964 / 99	– elastische Eigen- schaften	1970 / 149 ff. 1978 / 42 ff.	Zementsuspension	1961 / 177 ff. 1962 / 141 1970 / 21 ff. 1972 / 51 ff. 1973 / 21 ff. 1976 / 123 ff. 1994 / 18 f.
				Zeta-Potential	2012 / 7 ff.
				Zugabewasser	siehe Anmachwasser
				Zugfestigkeit	1962 / 106 f. 1963 / 60 f. 79 f. 1964 / 59 ff. 1970 / 99 ff. 1976 / 156 1981 / 114 (siehe auch Biegezugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit)
				Zumahlstoff	1983 / 82 ff. 1991 / 174 f.

Zumahlstoff (Forts.)	195 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Zusatzmittel (Forts.)		Zusatzmittel (Forts.)	
		– Fließmittel (Forts.)	94 f. 2003 / 91 ff. 125 ff. 2012 / 7 ff. 2012 / 41 ff.	– Wirksamkeits- prüfung	1975 / 33 ff. 47 ff.
Zusatzmittel	1962 / 57 1964 / 87 ff. 1968 / 93 1972 / 179 f. 1975 / 33 ff. 1976 / 144 ff. 1979 / 13 ff. 1981 / 161 ff. 1983 / 169 ff. 1997 / 33 ff. 45 ff. 61 ff. 2000 / 40 127 2009 / 19 ff. 39 ff. 2012 / 7 ff. 2012 / 19 ff. 2012 / 41 ff.	– Langzeitverzögerer	2006 / 55 ff.	– Elution	1997 / 39 ff.
		– LP-Bildner	1960 / 9 ff. 118 1962 / 131 160 ff. 1964 / 104 ff. 1965 / 167 1975 / 40 ff. 1977 / 64 1991 / 204 1997 / 91 f. 2003 / 87 ff. 2009 / 39 ff. 2012 / 19 ff. 2012 / 41 ff.	– RR/UV-Spektroskopie	1997 / 34 ff.
– Beschleuniger	1964 / 99 ff. 1973 / 142 ff. 1975 / 44	– Superverflüssiger	siehe Fließmittel	Zusatzstoffe	1960 / 101 ff. 1964 / 97 ff. 1968 / 93 f. 1969 / 27 f. 1972 / 180 f. 1976 / 145 f. 1981 / 161 ff. 1985 / 123 1988 / 175 ff. 1991 / 83 ff. 114 f. 157 ff. 1994 / 151 ff. 1997 / 69 ff. 2000 / 25 ff. 40 126 2003 / 125 ff. 150 f. 2009 / 7 ff.
– Dichtungsmittel	1964 / 117 f. 1975 / 42 f. 105 ff. 1977 / 64	– Verflüssiger	1961 / 241 ff. 1964 / 102 ff. 1975 / 39 f. 1979 / 17 ff. 1985 / 122 f. 1991 / 204 1997 / 33 45 94 f.	– k-Wert	2012 / 69 ff.
– Einpresshilfen	1975 / 44 f.			– organische	1994 / 166 2000 / 113 f.
– Fettalkohol	1979 / 24 ff.	– Verzögerer	1961 / 260 ff. 1964 / 102 ff. 1969 / 75 1975 / 43 f. 1979 / 17 ff. 1981 / 162 f. 1983 / 169 ff. 1985 / 122 f. 1991 / 204 2003 / 71 ff.	Zuschlag	siehe Gesteinskörnung
– Fließmittel	1974 / 32 ff. 1975 / 39 f. 1977 / 64 151 1979 / 17 ff. 1983 / 113 ff. 1985 / 122 f. 1991 / 21 ff. 1994 / 156 1997 / 61			Zwangzugspannungen	1994 / 181 2000 / 64 f. 76 f. 2003 / 164 2009 / 57 ff.
				Zwischenlagen	1960 / 27 1961 / 49 ff.



VDZ gGmbH
P. O. Box 30 10 63, 40410 Düsseldorf, Germany
Tannenstrasse 2, 40476 Düsseldorf, Germany
Phone: +49 (0) 211 45 78-1
Fax: +49 (0) 211 45 78-296
info@vdz-online.de
www.vdz-online.de