



Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports



2013 – 2015

**Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports
2013–2015**

Herausgeber: Dr. rer. nat. Martin Schneider



VDZ
Postfach 30 10 63
D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2
D-40476 Düsseldorf

VDZ
P.O. Box 30 10 63
40410 Duesseldorf, Germany
Tannenstrasse 2
40476 Duesseldorf, Germany

Die Betontechnischen Berichte sollten in der Literatur wie folgt zitiert werden / The Concrete Technology Reports should be cited in literature as follows:
Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Betontechnische Berichte 2013-2015. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik, 2016 (Betontechnische Berichte ; Concrete technology report 33)

VLB-Meldung

VDZ gGmbH (Hrsg.)

Betontechnische Berichte
Concrete Technology Reports
2013–2015

Band 1: 1960 (1961)

Band 33: Bibliographische Deskription nach 2013–2015 (2016)
Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2016

ISSN 0409-2740
ISBN 978-3-7640-0618-1

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

© by Verlag Bau+Technik GmbH
Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH,
Steinhof 39, 40699 Erkrath
www.verlagbt.de

Inhaltsverzeichnis / Content

Vorwort	4
Foreword	5
Luftporenbildung in Labor und Praxis	7
Air void formation in the laboratory and in practice	
<i>Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf</i>	
Zemente mit hohen Kalksteingehalten – Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit	21
Cements with a high limestone content – durability and practicability	
<i>Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf, Carl-Alexander Graubner, Tilo Proske, Stefan Hainer, Moien Rezvani, Darmstadt, Winfried Neufert, Ines Reuken, Erwitte</i>	
Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton	31
Characteristic values based on degree of hydration for predicting the durability of concrete	
<i>Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf, Albrecht Wolter, Thomas Bohne, Clausthal</i>	
Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen	39
Practical testing of alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in ASR performance tests	
<i>Ingmar Borchers und Christoph Müller, Düsseldorf</i>	
Das Wasserabsondern von Beton für Industrieböden – Laborergebnisse und Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse	49
Water secretion from concrete for industrial floors – laboratory results and their applicability to practical conditions	
<i>Maria Teresa Alonso und Patrick Schöffel, Düsseldorf</i>	
Zielsichere Herstellung von Industriebetonböden – Praxis- und Laborergebnisse sowie Hinweise zur Stabilität	67
Dependable production of concrete industrial floors – practical results, laboratory results and some notes on stability	
<i>Maria Teresa Alonso und Patrick Schöffel, Düsseldorf</i>	
Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe	87
Achieving the intended concrete properties in modern 5-material systems of varied concrete constituents	
<i>Jochen Reiners, Christoph Müller, Düsseldorf, Joose Penttilä, Rolf Breitenbücher, Bochum</i>	
Betonbau im Wandel	95
Concrete construction in a state of flux	
<i>Christoph Müller, Düsseldorf, und Udo Wiens, Berlin</i>	
Sachverzeichnis 1960 bis 2015	107

Vorwort

Zement und Beton haben sich seit Jahrzehnten insbesondere deshalb bewährt, weil die Qualitätsüberwachung für Herstellung und Verwendung lückenlos geregelt ist und den Anforderungen an sichere und dauerhafte Bauwerke genügt. Moderne Betone sind heute komplexe Systeme verschiedener Betonausgangsstoffe, die sich in völlig unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und Anwendungsbereichen bewähren müssen. Die jüngere Erfahrung mit der Anwendung der bestehenden Betonnormen in Deutschland hat gezeigt, dass die vorhandenen Regelungen und Prüfungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften für einige Anwendungssituationen weiterzuentwickeln sind, um die erforderliche Betonbauqualität zielsicher über die Planungsphase, die Beton-technik und die Ausführung zu erreichen. Öffentliche Bauherren und Bauausführende fordern für anspruchsvolle Bauteile, Bauverfahren und besondere Betonarten planbare, baustellengerechte Frischbetoneigenschaften. Der in diesem Sammelband enthaltene Betontechnische Bericht zum Thema „Robuste Frischbetoneigenschaften“ sowie die Beiträge zum Wasserabsondern von Beton und zur zielsicheren Herstellung von Industriebetonböden geben diesbezüglich einige Antworten. Aussagekräftige Erstprüfungen unter Berücksichtigung aller relevanten Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie der Produktions-, Transport- und Einbaubedingungen bis hin zur Übergabe- bzw. Einbaustelle sind in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Dies wird am Beispiel der Luftporenbildung von LP-Betonen in Labor und Praxis gezeigt.

4

Die Dauerhaftigkeit der Baustoffe spielt 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. Die besondere Herausforderung besteht darin, den umweltpolitischen Randbedingungen des Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz gerecht zu werden und zur gleichen Zeit die Langlebigkeit der Betonbauwerke als zentrale Nachhaltigkeitskomponente nicht aus den Augen zu verlieren. Am Beispiel von Zementen mit hohen Kalksteingehalten wird gezeigt, dass hier auch Grenzen des technisch Machbaren erreicht werden können.

Im Rahmen der europäischen Normenarbeit für zukünftige Revisionen der EN 206 wird diskutiert, ob Dauerhaftigkeits- bzw. Widerstandsklassen für Betone definiert werden können, um ggf. zu einer europaweit vergleichbaren Definition der Leistungsfähigkeit von Beton bzgl. seiner Dauerhaftigkeit zu kommen. Dabei spielt auch die Frage eine Rolle, welche Aussagen über die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton anhand der Druckfestigkeit möglich sind. Umfangreiche Praxiserfahrungen rechtfertigen dieses Vorgehen im Rahmen der heute gültigen nationalen Anwendungsregeln. Für neue Stoffe oder besondere Beanspruchungen 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 klinkereffiziente Zemente das Dauerhaftigkeitspotenzial bereits im Vorfeld abschätzen zu können bzw. Instrumente zur fortlaufenden Bewertung der Konformität zur Verfügung zu stellen. Hier müssen Parameter gefunden werden, die einen Rückschluss auf die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfung am Beton zulassen, ohne in jedem Fall die gesamte Prüfung wiederholen zu müssen. Im Fall von AKR-Performance-Prüfungen erfolgt hierzu u. a. eine Bestätigungsprüfung an der Gesteinskörnung mit Schnelltest und Röntgenbeugungsanalyse. Im Falle anderer Dauerhaftigkeitsparameter wie z. B. beim Chlorideindringen oder der Frostprüfung sind Parameter geeignet, die am Zementstein bzw. Normmörtel bestimmbar sind, und eine Aussage zum Hydratationsgrad und zur Gefügebildung ermöglichen. Erste Ansätze hierzu finden sich im Projekt „Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton“.

Neben technischen Aspekten spielen manchmal auch „andere Begleitumstände“ eine Rolle, die zu Veränderungen in der „Normenlandschaft“ führen. Mit dem Urteil in der Rechtssache C-100/13 hat der Europäische Gerichtshof (EuGH) verdeutlicht, dass zusätzliche Anforderungen an CE-gekennzeichnete Bauprodukte unzulässige Handelshemmnisse darstellen und somit gegen europäisches Recht verstoßen. Ein Beitrag dieses Sammelbands erläutert mögliche Konsequenzen dieses Urteils für die Normen des Betonsbaus.

Die Betontechnischen Berichte dieses 33. Sammelbands stellen den aktuellen Wissensstand auf wesentlichen Gebieten der Betontechnologie und aktueller Normung in komprimierter Form dar. Der vorliegende Band umfasst die Betontechnischen Berichte der Jahre 2013 bis 2015 in bewährter Art und Weise in deutscher und in englischer Sprache. Alle 33 Bände ergeben zusammen ein umfangreiches und verlässliches Nachschlagewerk für Forscher und Anwender. Unser Dank gilt den Autoren und allen Beteiligten, die zum Gelingen dieses Werks beigetragen haben.

Foreword

Cement and concrete have proved particularly successful for decades because their production and use are subject to continuous monitoring and quality control, and they satisfy the requirements for safe and durable structures. Modern concretes are complex systems made up of a variety of constituents and have to prove themselves in widely differing ambient conditions and areas of application. Recent experience with the application of the existing concrete standards in Germany has shown that the existing regulations and tests on fresh and hardened concrete properties need to be developed further for some application situations. This would enable the requisite quality of concrete construction to be achieved dependably through the design phase, concrete technology and execution. For demanding structural elements, methods of construction and special types of concrete, public employers and contractors require predictable fresh concrete properties that are acceptable on the building site. The concrete technology report contained in this volume on the topic of “Robust fresh concrete properties” and the contributions on water secretion from concrete and on dependable production of concrete industrial floors provide some answers on this subject. Informative preliminary tests that take account of all the relevant fresh and hardened concrete properties as well as the production, transport and execution conditions up to the point of handover or placement are particularly important in this connection. This is demonstrated using the example of air void formation in air-entrained concretes in the laboratory and in practice.

The durability of building materials plays an essential part in the construction of sustainable structures. Concrete construction can display its strengths to the full here. For this reason a substantial part of the research work by the VDZ is devoted to this central topic. The particular challenge is to comply with environmental policy conditions on climate protection and resource efficiency and at the same time not lose sight of the durability of the concrete structures as a central component of sustainability. Using the example of cements containing high levels of limestone it is shown that it is possible to reach the limits of technical feasibility.

As part of the work on the European standards for future revisions of EN 206 there is a discussion about whether it is possible to define durability resistance classes for concretes in order, where appropriate, to reach a Europe-wide definition of the performance of concrete with regard to its durability. The question whether durability properties of concrete can be obtained from the compressive strength also plays a part here. Extensive practical experience justifies this procedure in the context of the national application rules that are currently valid. This procedure cannot be applied to new materials or special stresses without further testing. This will also form a focal point for the research by the VDZ over the next years. It will be a question of possibly being able to estimate the durability potential beforehand for new clinker-efficient cements and/or making instruments available for ongoing evaluation of conformity. It will be necessary to find parameters that permit conclusions to be drawn about the results of the durability test on the concrete without having to repeat the entire test in every case. In the case of ASR performance testing a confirmatory test, among other things, is carried out for this purpose on the aggregate with a rapid test and X-ray diffraction analysis. In the case of other durability parameters, such as with chloride penetration or freeze-thaw testing, there are suitable parameters that can be determined on the hardened cement paste or standard mortar and provide information about the degree of hydration and the formation of the microstructure. First approaches in this direction can be found in the project entitled “Characteristic values for predicting the durability of concrete that are based on the degree of hydration”.

“Other attendant circumstances” that lead to changes in the “standards landscape” sometimes also play a part alongside the technical aspects. With the judgement in the C-100/13 case the European Court of Justice has made it clear that additional requirements imposed on building products carrying the CE mark represent inadmissible obstacles to trade and are therefore in violation of European law. A contribution in this volume explains the possible consequences of this judgement for the concrete construction standards.

The concrete technology reports in this 33rd collected volume represent the current state of knowledge in important areas of concrete technology and current standardization in compressed form. This volume comprises the concrete technology reports for the years 2013 to 2015 as usual in German and English. All 33 volumes together make up a comprehensive and dependable reference work for researchers and users. Our thanks go to the authors and all those involved who have contributed to the success of this work.

Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf

Luftporenbildung in Labor und Praxis

Air void formation in the laboratory and in practice

Übersicht

Wird bei der Herstellung von Luftporenbeton infolge einer kurzen Mischzeit der LP-Bildner zur Erreichung eines angestrebten Luftgehalts überdosiert, enthält der Frischbeton nicht aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie kann sich der Luftgehalt des Betons erhöhen. Das Ausmaß der Erhöhung (Nachaktivierungspotenzial) wird wesentlich von der Wirkstoffbasis des LP-Bildners beeinflusst. Eine ausreichend lange Mischzeit beugt in jedem Fall einem Anstieg des Luftgehalts vor. Die genaue Kenntnis der mischzeitabhängigen Luftporenbildung ist daher von großer Bedeutung für die zielsichere Herstellung eines anforderungsgerechten LP-Betons. In Laborversuchen kann in einer erweiterten Erstprüfung die Wirkungsweise eines LP-Bildners gekennzeichnet werden. Die Luftporenbildung wird aber auch durch den Mischertyp, die Mischungsgröße, die Füllmenge und die Mischintensität beeinflusst. Ungeklärt war bisher die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf baupraktische Bedingungen. In einem Forschungsvorhaben wurde daher die mischzeitabhängige Luftporenbildung am Frisch- und Festbeton in zwei Versuchsreihen im Labor und in einem Transportbetonwerk ermittelt. Der Vergleich der Versuchsreihen zeigt, dass in Laborversuchen das Nachaktivierungspotenzial in der Praxis ermittelt werden kann.

1 Einleitung

Voraussetzung für die zielsichere Herstellung eines anforderungsgerechten Luftporenbetons ist die Kenntnis der Wirkungsmechanismen bei der Luftporenbildung. Die bisherigen Untersuchungen basieren auf kleinformatigen Laborversuchen. In einem Forschungsvorhaben wurde untersucht, ob der dabei gefundene Einfluss von Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auf das Nachaktivierungspotenzial auch unter Praxisverhältnissen bei der Herstellung in einer Transportbeton- oder Baustellenmischanlage erhalten bleibt. Damit sollte der Nachweis der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Erstprüfung auf die Praxis erbracht werden. Die Kenntnis der Zusammenhänge ermöglicht es, das Risiko einer unerwünschten Luftporenbildung bzw. eines nicht anforderungsgerechten Luftporensystems im Festbeton zu verringern.

2 Stand der Erkenntnisse

In der Praxis wurde bei einigen Betondeckenlosen bei Verwendung von LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein stark erhöhter Luftgehalt im Festbeton festgestellt. Laboruntersuchungen zeigten, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts dann auftreten kann, wenn der LP-Bildner infolge zu kurzer Mischzeit überdosiert wurde, um den angestrebten Luftgehalt einzuhalten. Der Frischbeton enthält dann nicht ausreichend aktivierten LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie in den Frischbeton, z.B. während des Einbaus durch die Verteilerschnecke des Gleitschalungsfertigers, werden weitere Luftblasen stabilisiert und der Luftgehalt kann ansteigen. Ähnliche Effekte sind bei Transportbeton bekannt, bei dem sich der Luftgehalt zwischen Mischwerk und Baustelle durch die drehende Trommel erhöhen kann.

Das Ausmaß der Erhöhung, das Nachaktivierungspotenzial, wird wesentlich von der Wirkstoffbasis des verwendeten LP-Bildners beeinflusst. Bei LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis

Abstract

If, as a result of a short mixing time, excess air entraining agent is added during the production of air-entrained concrete in order to achieve the required air content then the fresh concrete will contain air-entraining agent that has not been activated. If there is a subsequent input of mixing energy the air content of the concrete can rise. The extent of this rise (the re-activation potential) is affected substantially by the active substance on which the air-entraining agent (AEA) is based. A sufficiently long mixing time always avoids any rise in air content. Accurate understanding of the way the air void formation depends on mixing time is therefore very important for dependable production of air-entrained concrete that meets the requirements. The functioning of an air-entraining agent can be characterized in laboratory trials during extended initial testing. However, the air void formation is also affected by the mixer type, quantity of mixture, filling level and mixing intensity. The extent to which laboratory results can be applied to practical construction conditions has not yet been clarified. The air void formation in fresh and hardened concrete in relation to the mixing time was therefore determined in the laboratory and in a ready-mixed concrete plant in a research project. Comparison of the test series shows that the re-activation potential under practical conditions can be determined in laboratory trials.

1 Introduction

The basic requirement for dependable production of an air-entrained concrete that meets the requirements is an understanding of the action mechanisms involved in the formation of air voids. Previous investigations have been based on small-scale laboratory trials. A research project examined whether the influence of mixing time, the basis of the active substance in the air-entraining agent and the quantity of agent added on the re-activation potential found in laboratory trials also holds true under practical conditions during production in a ready-mixed concrete plant or construction site mixing plant. This should prove whether the results of the initial testing can be applied to practical conditions. An understanding of the relationships will make it possible to reduce the risk of unwanted air void formation and of an air void system in the hardened concrete that does not meet the requirements.

2 Current understanding

A sharply increased air content has been found in the hardened concrete in some sections of concrete pavement when using air-entraining agents based on synthetic active substances. Laboratory investigations have shown that a substantial increase in air content can occur if, as result of too short a mixing time, excess air-entraining agent is added in order to maintain the required air content. The fresh concrete will then contain air-entraining agent that has not been sufficiently activated. More air bubbles will be stabilized if there is a subsequent input of mixing energy into the fresh concrete, e.g. by the distributing screw of the slipform paver during placement, and the air content can rise. Similar effects are known with ready-mixed concrete, in which the air content can rise between the mixing plant and the construction site due to the rotating drum.

The extent of the rise, the re-activation potential, is affected substantially by the active substance on which the air-entraining agent used is based. With air-entraining agents based on natural

(Wurzelharze) fällt auch bei überhöhter Zugabe der größte Anteil des zugegebenen LP-Bildners in der Porenlösung aus. Trotz überproportionaler Zugabe des LP-Bildners erhöht sich der Luftgehalt des Betons daher vergleichsweise wenig. Diese LP-Bildner sind immer fast vollständig aktiviert und haben ein vergleichsweise geringes Nachaktivierungspotenzial. Bei LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis verbleibt bei verkürzter Mischzeit und Überdosierung infolge der besseren Löslichkeit ein größerer Anteil des zugegebenen LP-Bildners in der Porenlösung. Bei einem nachträglichen Eintrag von Mischenergie werden fortlaufend Luftblasen in den Frischbeton eingeführt und stabilisiert, bis der gesamte LP-Bildner vollständig aktiviert ist. Eine nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts kann daher in der Baupraxis bei Verwendung synthetischer LP-Bildner auftreten [1].

Die Herstellung eines sachgerechten Luftporenbetons setzt eine umfangreiche Erstprüfung voraus, bei der die vielfältigen Einflüsse auf die Luftporenbildung berücksichtigt werden. Entsprechende Regelungen für die Zusammensetzung und Herstellung von LP-Beton sind im Regelwerk [2–4] festgelegt. Um das Nachaktivierungspotenzial eines Betons bereits im Rahmen der Erstprüfung abschätzen zu können, werden erweiterte Frischbetonprüfungen empfohlen [5, 6]. In einem Zusatzversuch (Bild 1) kann die in der Erstprüfung ermittelte LP-Bildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden LP-Bildner-Zugabemengen nach einer kurzen Mischzeit von z.B. 30 Sekunden und nach einer verlängerten Mischzeit von rd. vier bis sechs Minuten bestimmt werden. Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischzeit besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts. Dies kann unabhängig von den jeweiligen Randbedingungen in jedem Fall vermieden werden, wenn der LP-Bildner bereits bei der Herstellung durch eine ausreichend lange Mischzeit vollständig aktiviert wurde.

Die Kenntnis der mischzeitabhängigen Luftporenbildung ist daher von großer Bedeutung für die Abschätzung des Nachaktivierungspotenzials. Die Empfehlungen basieren auf Versuchen mit Labormischern (Volumen rund 0,1 m³). Luftgehalt und Luftporenverteilung sind neben der Betonzusammensetzung und der Frischbetontemperatur auch von der Art und Weise der Herstellung des Betons, wie z.B. Mischertyp, Mischungsgröße und Mischintensität abhängig [7–10].

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ziel und Umfang der Versuche

Die Untersuchungen sollten grundlegende Erkenntnisse zu den Wirkungsmechanismen der LP-Bildner bei der Verwendung unter Praxisbedingungen in einer Mischanlage liefern. Zunächst wurden drei LP-Bildner mit unterschiedlichem Nachaktivierungspotenzial ausgewählt. Anschließend wurde die mischzeitabhängige LP-Bildung am Frisch- und Festbeton in zwei Versuchsreihen im Labor und in einer Transportbetonmischanlage mit vergleichbaren Ausgangsstoffen und Betonzusammensetzungen ermittelt. Dies sollte den Nachweis erbringen, dass die im Rahmen der Erstprüfung im Labor festgestellten Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auch auf die Praxis übertragbar sind.

3.2 Laborversuche

3.2.1 Erstprüfung

3.2.1.1 Ausgangsstoffe

Unter Berücksichtigung vorliegender Untersuchungsergebnisse [1] wurden drei LP-Bildner mit unterschiedlicher Wirkstoffbasis ausgewählt: Wirkstoff mit geringem Nachaktivierungspotenzial: modifiziertes Wurzelharz, Wirkstoff mit mittlerem Nachaktivierungspotenzial: Alkylsulfat und Wirkstoff mit hohem Nachaktivierungspotenzial: Alkylpolyglycoethersulfat. Um praxisgerechte Bedingungen zu simulieren, wurden verdünnte LP-Bildner verwendet. Als Zement wurde ein in dem entsprechenden Transportbetonwerk standardmäßig eingesetzter CEM I 42,5 N verwendet. Der Zement wurde Ende 2011 in das FIZ eingeliefert. Zu diesem Zeitpunkt und während der Praxisversuche (Juni 2012) wur-

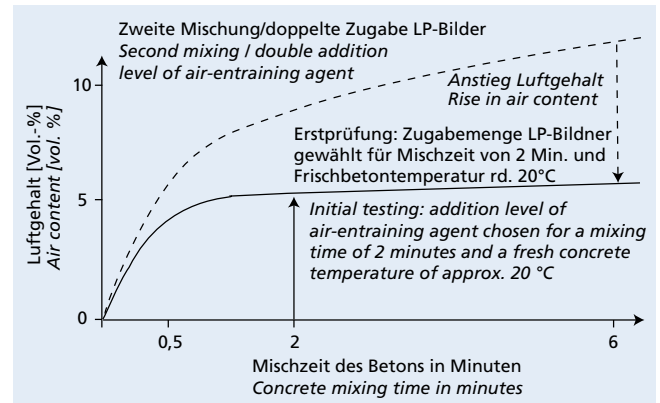


Bild 1: Prüfung des Nachaktivierungspotenzials einer Betonzusammensetzung bei der Erstprüfung im Labor [1]

Figure 1: Testing the re-activation potential of a concrete composition during initial testing in the laboratory [1]

active substances (wood resins) most of the air-entraining agent added is precipitated in the pore solution even if it has been added in excess. In spite of the disproportionately high addition level of air-entraining agent the increase in the air content of the concrete is therefore comparatively slight. These air-entraining agents are always almost completely activated and have a comparatively low re-activation potential. For air-entraining agents based on synthetic active substances with a shortened mixing time and excess addition level a fairly large proportion of the added air-entraining agent remains in the pore solution because of its better solubility. If there is a subsequent input of mixing energy, air bubbles will be continuously introduced into the fresh concrete and stabilized until all the air-entraining agent has been fully activated. A subsequent increase in the air content can therefore occur under construction conditions when synthetic air-entraining agents are used [1].

The production of an appropriate aerated concrete requires extensive initial testing in which the various factors affecting the air void formation are taken into account. Appropriate regulations for the composition and production of air-entrained concrete are laid down in the body of rules [2–4]. Extended fresh concrete tests are recommended so that even during the initial testing it is possible to assess the re-activation potential of a concrete [5, 6]. The addition level for the air-entraining agent determined in the initial testing can be doubled in an additional test (Fig. 1) and the air contents of the mixtures with the two addition levels of air-entraining agent can be determined after a short mixing time of, for example, 30 seconds and after an extended mixing time of about four to six minutes. If there is a substantial rise in the air content with the doubled addition level and extended mixing time there is the risk of a subsequent increase in air content when the construction work is carried out. Regardless of the particular conditions this can always be avoided if the air-entraining agent has already been fully activated during production by using a sufficiently long mixing time.

An understanding of air void formation relative to the mixing time is therefore very important for assessing the re-activation potential. The recommendations are based on the trials with laboratory mixers (capacity approximately 0.1 m³). Air content and air void distribution are dependent not only on the concrete composition and the fresh concrete temperature but also on the manner in which the concrete is produced, such as mixer type, size of mix and mixing intensity [7–10].

3 Test procedure

3.1 Aim and extent of the trials

The investigations were intended to provide a basic understanding of the action mechanism of the air-entraining agents during use under practical conditions in a mixing plant. The first step was to select three air-entraining agents with different re-activation potentials. The air void formation in fresh and hardened concrete relative to the mixing time was then determined in two test series

den Zementproben aus dem Silo entnommen. Die Zementproben erfüllten die Anforderungen der DIN EN 197 Teil 1 und zusätzlich der TL Beton-StB 07. Für Labor- und Praxisversuche wurden die im Transportbetonwerk verwendeten Gesteinskörnungen (Rheinsand 0/2 mm, Rheinkies 2/8 und 8/16 mm aus dem Raum Düsseldorf) eingesetzt. Für die Herstellung der Betone wurde das vorhandene Leitungswasser verwendet.

3.2.1.2 Mischungszusammensetzung

Der Zementgehalt betrug 350 kg/m^3 und der w/z-Wert 0,44. Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus Rheinkies 0/16 mm mit einer Sieblinie in der Mitte des Sieblinienbereichs A/B 16 nach DIN 1045-2. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug 1797 kg/m^3 . Der Frischbeton sollte rund 30 Min. nach der Herstellung eine steife Konsistenz (Verdichtungsmaßklasse C1, $v \geq 1,26$) aufweisen.

3.2.1.3 Herstellung

Die Zugabemenge des jeweiligen LP-Bildners wurde so eingestellt, dass bei einer Frischbetontemperatur von rd. 20°C der Luftgehalt des Betons geprüft mit dem 8-l-Drucktopf zehn Minuten nach der Herstellung ($5,0 \pm 0,5$) Vol.-% betrug. Von jedem Beton wurden 150 l Frischbeton hergestellt. Zement und Gesteinskörnungen wurden in einem 250-l-Zwangsmischer 15 Sekunden trocken vorgemischt. Der LP-Bildner wurde unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Die Mischzeit nach Zugabe aller Bestandteile betrug zwei Minuten.

a) Frischbetonuntersuchungen

10 und 30 Minuten nach der Herstellung (Mischende) wurden Luftgehalt und Rohdichte mit dem 8-l-Drucktopf sowie die Konsistenz mit dem Verdichtungskasten bestimmt. LP-Topf und Verdichtungskasten wurden auf dem Rütteltisch verdichtet.

b) Festbetonuntersuchungen

Zehn Minuten nach Mischende wurden für die Prüfungen am Festbeton Probekörper in Stahlformen auf dem Rütteltisch verdichtet. Es wurden sieben Würfel mit 150 mm Kantenlänge hergestellt: Drei Würfel zur Bestimmung der 28-Tage-Druckfestigkeit bzw. der LP-Kennwerte am Festbeton (1 Würfel) sowie drei Würfel mit eingelegter Teflonscheibe zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Verfahren.

3.2.1.4 Lagerung und Prüfung

a) Frischbeton

Am Frischbeton wurden die Temperatur und Rohdichte sowie der Luftgehalt mittels Druckausgleichsverfahren im 8-l-Luftporentopf bestimmt. Zusätzlich wurde das Verdichtungsmaß ermittelt. Die Durchführung der Prüfungen entsprach den Normen der Reihe DIN EN 12350.

b) Festbeton

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 ± 5) % in ihren Formen abgedeckt mit feuchten Tüchern gelagert. Anschließend wurden die Probekörper ausgeschalt. Die Probekörper wurden danach wie folgt gelagert und geprüft:

Druckfestigkeit

Drei Würfel wurden nach dem Ausschalen nach DIN EN 12390-2:2001-06 bis zum Alter von sieben Tagen unter Wasser und danach bis zur Prüfung der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-3 im Klimaraum bei einer Lufttemperatur von ($20,0 \pm 2,0$) $^\circ\text{C}$ und einer rel. Luftfeuchtigkeit von (65 ± 5) % gelagert.

LP-Kennwerte

Ein Würfel wurde 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

in the laboratory and in a ready-mixed concrete mixing plant using comparable starting materials and concrete compositions. This was intended to prove that the interactions and relationships between mixing time, active substance basis and addition level of the air-entraining agent established during the initial testing in the laboratory can also be applied to practical conditions.

3.2 Laboratory trials

3.2.1 Initial testing

3.2.1.1 Starting materials

Three air-entraining agents based on different active substance were chosen after considering the available investigative results [1]: active substance with low re-activation potential: modified wood resin, active substance with average re-activation potential: alkyl sulfate, and active substance with high re-activation potential: alkyl polyglycol ether sulfate. Diluted air-entraining agents were used in order to simulate the conditions that occur in practice. A CEM I 42,5 N cement that is used as standard in the corresponding ready-mixed concrete plant was used as the cement. The cement was delivered to the Research Institute of the Cement Industry at the end of 2011. Cement samples were taken from the silo at this time and during the practical trials (June 2012). The cement samples fulfilled the requirements of DIN EN 197 Part 1 and also of TL Beton-StB 07. The aggregates used in the ready-mixed concrete plant (0/2 mm Rhine sand, 2/8 and 8/18 mm Rhine gravel from the Düsseldorf area) were used for the laboratory and practical trials. The local mains water was used for producing the concretes.

3.2.1.2 Mix composition

The cement content was 350 kg/m^3 and the w/c ratio was 0.44. The aggregate mix consisted of 0/16 mm gravelly Rhine sand with a grading curve in the middle of the A/B 16 grading curve range specified in DIN 1045-2. The aggregate content was 1797 kg/m^3 . It was intended that the fresh concrete should have a stiff consistency (compacting factor class C1, $v \geq 1.26$) at about 30 minutes after production.

3.2.1.3 Production

The amount of the respective air-entraining agents added was set so that at a fresh concrete temperature of about 20°C the air content of the concrete tested with the 8 l pressure vessel ten minutes after production was 5.0 ± 0.5 vol. %. 150 l of fresh concrete was produced for each concrete. The cement and aggregate were premixed dry for 15 seconds in a 250 l mechanical mixer. The air-entraining agent was added to the mixing water immediately before the concrete was mixed. The mixing time after the addition of all the constituents was two minutes.

a) Fresh concrete investigations

The air content and bulk density were determined with the 8 l pressure vessel and the consistency was determined with the compaction box 10 and 30 minutes after the production (end of mixing). The air void vessel and the compaction box were compacted on a vibrating table.

b) Hardened concrete investigations

Test pieces were compacted in steel moulds on the vibrating table ten minutes after the end of mixing for the tests on the hardened concrete. Seven cubes with edge lengths of 150 mm were produced: three cubes for determining the 28-day compressive strength and the air void parameters in the hardened concrete (1 cube) as well as three cubes with inserted Teflon sheets for testing the resistance to freeze-thaw with de-icing salt by the CDF method.

3.2.1.4 Storage and testing

a) Fresh concrete

The temperature and bulk density were determined as well as the air content of the fresh concrete using the pressure equalization method in the 8 l air void vessel. The compacting factor was also measured. The tests were carried out in accordance with the DIN EN 12350 series of standards.

Tafel 1: Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen (Labor)

Table 1: Results of the fresh concrete investigations (laboratory)

Wirkstoffbasis LP-Bildner Active substance basis of air-entraining agent	Feststoffgehalt LP-Bildner in M.-% Solids content of air-entraining agent in mass %	Zugabemenge in M.-% v. z. Quantity added in mass % w.r.t. cement		Luftgehalt in Vol.-% Air content in vol. %		Verdichtungsmaß Compacting factor	
		LP-Bildner Air-entraining agent	Wirkstoff Active substance	10 min	30 min	10 min	30 min
Mod. Wurzelharz Modified wood resin	4,12	0,30	0,012360	5,3	4,5	1,24	1,27
Alkylsulfat Alkyl sulfate	1,69	0,30	0,005100	5,5	4,8	1,21	1,23
Alkylpolyglycoethersulfat Alkyl polyglycol ether sulfate	0,32	0,47	0,001504	4,7	3,6	1,20	1,24

Bestimmung der LP-Kennwerte in Anlehnung an DIN EN 480-11 entnommen wurden.

Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Verfahren

Drei Würfel mit eingelegter Teflonscheibe wurden nach einem Tag ausgeschalt. Fünf CDF-Platten (Abmessungen rund 150 mm x 110 mm x 75 mm) wurden unter Wasser gelagert. Nach sieben Tagen wurden die CDF-Platten bis zum 28. Tag im Klimaraum 20/65 gelagert. Zwischen dem 21. und dem 26. Tag nach der Herstellung der Probekörper wurden die seitlichen Flächen der CDF-Platten mit einem Aluminiumklebeband mit Butylkautschuk versiegelt. Danach wurden die Probekörper wieder im Klimaraum gelagert. Nach dem 28. Tag wurden die Probekörper entsprechend DIN CEN/TS 12390-9 sieben Tage in einem Fußbad aus 3%iger NaCl-Lösung vorgelagert. Danach begann die Frost-Tau-Beanspruchung mit täglich zwei Wechseln (geschaltete Teflonscheibe als Prüffläche). Nach i.d.R. 7, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln wurden als Kenngrößen der relative dynamische E-Modul und die Abwitterung der Prüffläche ermittelt. Der dynamische E-Modul berechnete sich aus der Ultraschalllaufzeit im Beton und gibt einen Anhalt über das Ausmaß der inneren Schädigung.

3.2.2 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit

Die mischzeitabhängige Luftporenbildung im Frischbeton wurde mit den drei LP-Bildnern mit der im Vorversuch bestimmten „einfachen“ und einer demgegenüber verdoppelten und verdreifachten Zugabemenge bestimmt. Bei einfacher Zugabemenge wurde der LP-Bildner nicht auf das Zugabewasser angerechnet. Um bei allen drei Zugabemengen gleiche Wassergehalte zu gewährleisten, wurde bei doppelter bzw. dreifacher Zugabemenge die Zugabemenge des LP-Bildners einmal bzw. zweimal vom Zugabewasser abgezogen. Der geringe Feststoffgehalt der LP-Bildner (0,3 bis 4 M.-%, Tafel 1) wurde vernachlässigt. Die LP-Bildner wurden unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Nach Zugabe aller Bestandteile wurde der Beton 30 Sekunden gemischt, anschließend der Mischer kurz angehalten, Be-

b) Hardened concrete

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

Compressive strength

After they had been removed from the moulds three cubes were stored under water in accordance with DIN EN 12390-2:2001-06 until they were seven days old and then stored in a climatic chamber at an air temperature of 20.0 ± 2.0 °C and a relative air humidity of 65 ± 5 % in accordance with DIN EN 12390-3 until the compressive strength was tested at an age of 28 days.

Air void parameters

After it had been removed from the mould one cube was stored under water until it was seven days old and then stored in the climatic chamber until two slices were taken from the cube for determining the air void parameters using the procedure described in DIN EN 480-11.

Resistance to freeze-thaw with de-icing salt by the CDF method

Three cubes with Teflon sheet inserts were removed from their moulds after one day. Five CDF slabs (dimensions approximately 150 mm x 110 mm x 75 mm) were cut from the cubes and stored under water. After seven days the CDF slabs were stored in the 20/65 climatic chamber until the 28th day. Between the 21st and 26th day after the production of the test pieces the side faces of the CDF slabs were sealed with butyl rubber using aluminium adhesive tape. The test pieces were then stored in the climatic chamber again. After the 28th day the test pieces were placed for seven days in preliminary storage in a footbath of 3 % NaCl solution as specified in DIN CEN/TS 12390-9. The freeze-thaw stressing then started with two cycles per day (the test surface was the surface originally covered by Teflon sheet). The relative dynamic elastic

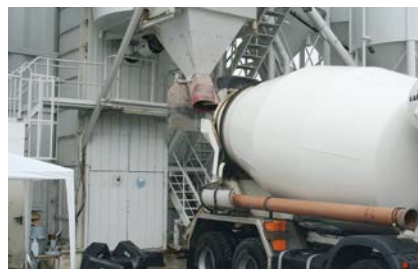


Bild 2: a) Übersicht über Mischanlage, Fahrmischer und Baustellenlabor; b) Ablassen von Frischbeton nach definierten Mischzeiten in den Fahrmischer; c) Ablassen des Frischbetons aus dem Fahrmischer in Mörtelwannen

Figure 2: a) General view of mixing plant, truck mixer and site laboratory; b) unloading fresh concrete into the truck mixer after a specified mixing time; c) unloading the fresh concrete from the truck mixer into mortar pans

ton für die Prüfung des Luftgehalts mit dem Drucktopf entnommen und unmittelbar der Luftgehalt entsprechend Abschnitt 3.2.1.4 bestimmt. Sofort nach der Entnahme des Betons aus dem Mischer wurde der Restbeton weiter gemischt und die Prüfung des Luftgehalts nach 45 Sekunden sowie nach 1, 2, 4, 6, 8, 10 und 15 Minuten wiederholt. Um den Einfluss von Mischzeit und Zugabemenge auf die LP-Kennwerte zu ermitteln, wurde bei den Varianten mit einfacher und doppelter Zugabemenge nach Mischzeiten von 30 Sekunden sowie ein, zwei und sieben Minuten jeweils ein Würfel (Kantenlänge 150 mm) hergestellt. Lagerung und Prüfung entsprach Abschnitt 3.2.1.4.

3.3 Praxisversuche

3.3.1 Allgemeines

Die Praxisversuche wurden im Transportbetonwerk der Dyckerhoff AG in Neuss durchgeführt. Es standen zwei unabhängig voneinander betriebene Mischanlagen zur Verfügung. Für die Versuche wurde die kleinere Mischanlage eingesetzt, sodass das normale Tagesgeschäft nicht beeinträchtigt wurde. Die Mischanlage war mit einem 2-m³-Tellerischer und Silos für Zement und Gesteinskörnungen (0/2 mm, 2/8 mm und 8/16 mm) ausgestattet. Die Versuche wurden an drei Tagen im Juni 2012 durchgeführt. An jedem Tag wurde ein anderer LP-Bildner erprobt: zuerst der LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis, danach die synthetischen LP-Bildner mit der Wirkstoffbasis Alkylsulfat bzw. Alkylpolyglycolethersulfat. Im Gegensatz zu den Laborversuchen wurde zuerst die mischzeitabhängige Luftporenbildung ermittelt, da diese Kurven zur Abschätzung der LP-Bildner-Zugabemengen für die Erstprüfung dienten, um nach Mischzeiten von 30, 45 bzw. 60 Sekunden einen Luftgehalt von rund 5 Vol.-% zu erzielen. Während der drei Tage war ein Anstieg der Lufttemperatur von im Mittel rund 20 °C über 23 °C auf bis zu 25 °C zu verzeichnen. Dies bewirkte auch eine entsprechende Erhöhung der Frischbetontemperaturen.

3.3.2 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit

In Vorversuchen wurde der Versuchsablauf erprobt und optimiert. Nach einer Mischzeit von 90 Sekunden ergab sich ein konstanter Luftgehalt. Längere Mischzeiten bewirkten keine wesentliche Änderung des angestrebten Luftgehalts von 5 Vol.-%. Daher wurde die LP-Bildnermenge so gewählt, dass nach einer Mischzeit von 90 Sekunden ein Luftgehalt von (5,0 ± 0,5) Vol.-% erzielt wurde. Mit dieser (einfachen) und einer doppelten und dreifachen Zugabemenge wurden die Mischzeitkurven ermittelt. Ein Anhalten des Mischvorgangs wie im Labor war in der Praxis nicht möglich, da das Anfahren Schäden durch eine Überlastung des Motors zur Folge gehabt hätte. Während des Praxisversuchs musste daher der Mischer über die gesamte Mischzeit von zehn Minuten ohne Unterbrechung durchlaufen.

Zur Vermeidung eines Motorschadens wurde außerdem die maximal mögliche Füllmenge des Mixers von 2 m³ auf 1,25 m³ reduziert. Um die LP-Bildung kontinuierlich aufzunehmen, wurde über eine Klappe an der Unterseite des Mixers nach festgelegten Zeiten jeweils rund 50 Liter Frischbeton in einen Fahrmischer abgelassen (Bilder 2 a bis c). Der Fahrmischer wurde mit rückwärts drehender Trommel entleert und der Frischbeton über eine Rinne in insgesamt sieben Mörtelwannen gefüllt. Jeder Mörtelwanne wurde eine Mischzeit von 30, 60 und 90 Sekunden sowie 2, 4, 7 und 10 Minuten zugeordnet. Auf die Mischzeit von 45 Sekunden wurde in der Praxis verzichtet, da hierbei keine exakte Trennung der nach 30, 45 und 60 Sekunden Mischzeit abgelassenen Frischbetonproben mehr möglich gewesen wäre.

Die Betonzusammensetzung entsprach den Laborversuchen. Gesteinskörnungen und Zement wurden aus den Silos abgezogen und abgewogen in den Mischer gegeben. Das Zugabewasser wurde in einen Vorratsbehälter abgewogen. Die Menge entsprach dem Gesamtwassergehalt (154 kg/m³, w/z = 0,44) vermindert um die Eigenfeuchte des Gesteinskörnungsgemisches. Die Eigenfeuchte der Gesteinskörnungen wurde täglich vor Versuchsbeginn ermittelt. Der abgewogene LP-Bildner wurde entsprechend der Vorgehensweise in den Laborversuchen direkt in den Behälter mit dem

modulus und the scaling of the test surface were determined after, as a rule, 7, 14 and 28 freeze-thaw cycles. The dynamic elastic modulus was calculated from the ultrasonic transit time in the concrete and provided an indication of the extent of the internal damage.

3.2.2 Air void formation relative to mixing time

The air void formation in fresh concrete relative to the mixing time was determined with the three air-entraining agents using the “single” addition level determined in the preliminary test and also double and triple addition levels. At the single addition level the air-entraining agent was not included in the calculation of the mixing water. For the double and triple addition levels the quantity of air-entraining agent added was subtracted once and twice respectively from the mixing water to ensure the same water content for all three addition levels. The low solids content of the air-entraining agents (0.3 to 4 mass %, Table 1) was ignored. The air-entraining agents were added to the mixing water immediately before the concrete was mixed. After addition of all constituents the concrete was mixed for 30 seconds and the mixer was then stopped briefly. Some concrete for testing the air content with the pressure vessel was removed and the air content was then determined immediately as described in Section 3.2.1.4. Immediately after the concrete had been removed from the mixer the remaining concrete was mixed further and the air content test was repeated after 45 seconds and after 1, 2, 4, 6, 8, 10 and 15 minutes. One cube (edge length 150 mm) was produced for each of the variants made with the single and double addition levels after mixing times of 30 seconds and one, two and seven minutes in order to determine the effect of mixing time and addition level on the air void parameters. The storage and testing were as described in Section 3.2.1.4.

3.3 Practical trials

3.3.1 General

The practical trials were carried out at Dyckerhoff AG's ready-mixed concrete plant in Neuss. Two mixing plants that operated independently of one another were available. The smaller mixing plant was used for the trials so that the normal daily business was not affected. The mixing plant was provided with a 2 m³ pan mixer and silos for cement and aggregates (0/2 mm, 2/8 mm and 8/16 mm). The trials were carried out over three days in June 2012. A different air-entraining agent was tested on each day: first the air-entraining agent based on natural active substances and then the synthetic air-entraining agents based on the alkyl sulfate and alkyl polyglycol ether sulfate active substances. In contrast to the laboratory trials the first measurements were of the air void formation relative to mixing time because these curves were used for estimating the quantities of air-entraining agent to be added for the initial testing to achieve an air content of about 5 vol. % after mixing times of 30, 45 and 60 seconds. A rise in air temperature from on average about 20 °C through 23 °C and up to 25 °C was recorded during the three days. This produced a corresponding increase in the fresh concrete temperature.

3.3.2 Air void formation relative to mixing time

The test procedure was examined and optimized in preliminary trials. A constant air content was obtained after a mixing time of 90 seconds. Longer mixing times did not produce any substantial change in the target air content of 5 vol. %. The quantity of air-entraining agent was therefore chosen so that an air content of 5.0 ± 0.5 vol. % was achieved after a mixing time of 90 seconds. This (single) as well as double and triple addition levels were used to determine the mixing time curves. An indication of the mixing process, such as was obtained in the laboratory, could not be obtained in the plant because the start-up would have caused damage to the motor due to overloading. The mixer therefore had to be run for the full mixing time of ten minutes without interruption during the practical trials.

The maximum possible capacity of the mixer was also reduced from 2 m³ to 1.25 m³ to avoid damage to the motor. At given times about 50 litres of fresh concrete was dropped into a truck

Tafel 2: Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen (Labor)

Table 2: Results of the hardened concrete investigations (laboratory)

Wirkstoffbasis LP-Bildner Active substance basis of air-entraining agent	28-Tage- Druck- festigkeit in N/mm ² 28-day compressive strength in N/mm ²	Rohdichte in kg/dm ³ Bulk density in kg/dm ³	Abwitterung nach 28 FTW in g/m ² Scaling loss after 28 freeze-thaw cycles in g/m ²	LP-Kennwerte am Festbeton Air void parameters in hardened concrete		
				Luftgehalt in Vol.-% Air content in vol. %	Mikroluft- porengehalt in Vol.-% Micro air void content in vol. %	Abstandsfaktor in mm Spacing factor in mm
Mod. Wurzelharz Modified wood resin	60,9	2,27	133	6,20	2,23	0,17
Alkylsulfat Alkyl sulfate	56,9	2,27	157	5,86	2,77	0,16
Alkylpolyglycolethersulfat Alkyl polyglycol ether sulfate	59,9	2,28	110	5,77	2,73	0,17

Zugabewasser zudosiert. Anschließend wurde das Zugabewasser in den Mischer auf den Zement und die Gesteinskörnungen gegeben. Die Mischzeit begann, nachdem das gesamte Wasser zugegeben war. Bei einfacher Zugabemenge wurde der LP-Bildner nicht auf den Wassergehalt angerechnet. Um bei allen drei Zugabemen-

mixer through a flap on the underside of the mixer (Figs. 2a to 2c) to permit continuous recording of the air void formation. The truck mixer was emptied by reversing the rotation of the drum and the fresh concrete was discharged via a chute into a total of seven mortar pans. Each mortar pan was allocated to a mixing time of 30,

Tafel 3: Frischbeton-Luftgehalte im Labor bzw. im Transportbetonwerk in Abhängigkeit der Wirkstoffart und Zugabemenge des LP-Bildners und der Mischzeit

Table 3: Fresh concrete air content in the laboratory and in the ready-mixed concrete plant in relation to the type of active substance and the quantity of AEA added and the mixing time

Wirkstoff Active substance	Mischzeit Mixing time	Luftgehalt in Vol.-% Air content in vol. %		Luftgehalt in Vol.-% Air content in vol. %		Luftgehalt in Vol.-% Air content in vol. %	
		Labor Laboratory	Werk Plant	Labor Laboratory	Werk Plant	Labor Laboratory	Werk Plant
		Zugabemenge: einfach Addition level: single		Zugabemenge: doppelt Addition level: double		Zugabemenge: dreifach Addition level: triple	
Modifiziertes Wurzelharz Modified wood resin	30 s	3,8	5,6	4,9	8,5	7,3	9,0
	45 s	3,9	–	5,0	–	7,2	–
	1 min	5,2	5,1	5,6	9,0	7,9	10,0
	1,5 min	–	5,5	–	9,0	–	10,5
	2 min	5,3	5,2	5,6	7,9	8,7	9,5
	4 min	6,4	5,2	6,6	8,0	8,0	10,5
	7 min	6,5	4,9	6,1	7,8	9,0	9,5
	10 min	6,2	4,3	6,9	6,0	8,9	8,0
Alkylsulfat Alkyl sulfate	15 min	6,2	–	6,3	–	8,7	–
	30 s	3,8	5,6	4,2	7,3	5,3	8,5
	45 s	3,9	–	5,7	–	5,8	–
	1 min	5,2	5,1	7,1	7,6	7,2	9,5
	1,5 min	–	5,5	–	7,9	–	10,5
	2 min	5,3	5,2	7,7	8,5	8,0	10,0
	4 min	6,4	5,2	7,9	8,0	11,5	12,0
	7 min	6,5	4,9	11,0	9,0	14,5	14,0
Alkylpoly- glycolether- sulfat Alkyl poly- glycol ether sulfate	10 min	6,2	4,3	10,5	9,5	13,5	14,5
	15 min	6,2	–	11,0	–	16,0	–
	30 s	2,8	5,0	4,9	5,8	6,3	6,7
	45 s	2,8	–	5,6	–	6,5	–
	1 min	3,6	5,6	6,0	7,4	7,6	9,0
	1,5 min	–	5,3	–	8,0	–	10,0
	2 min	5,1	5,4	7,3	9,0	8,3	10,0
	4 min	6,2	4,6	9,0	8,3	9,5	11,0
	7 min	6,8	5,0	9,5	8,0	13,0	11,5
	10 min	6,3	4,3	11,0	8,0	15,5	13,0
	15 min	6,0	–	11,0	–	18,0	–

gen gleiche w/z-Werte zu gewährleisten, wurde bei doppelter bzw. dreifacher Zugabemenge die Zugabemenge des LP-Bildners ein- bzw. zweimal vom Zugabewasser abgezogen. Mit jeder Charge wurden 1,25 m³ Frischbeton hergestellt.

3.3.3 Erstprüfung

Auf der Basis der Mischzeitkurven wurden die LP-Bildner-Zugabemengen festgelegt, um nach Mischzeiten von 30 (kürzere Mischzeit als Mindestmischzeit von 45 Sekunden nach TL Beton-StB [4]), 45 (Mindestmischzeit) und 60 Sekunden (längere Mischzeit) einen Frischbeton-Luftgehalt von $(5,0 \pm 0,5)$ Vol.-% zu erzielen. Wenn dieser Wert erreicht war, wurden folgende Probekörper hergestellt: drei Würfel (150 mm Kantenlänge) für die Prüfung der 28-Tage-Druckfestigkeit, ein Würfel (150 mm Kantenlänge) für die Bestimmung der LP-Kennwerte und vier Platten für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Verfahren. Gleichzeitig wurde bei diesen Untersuchungen die Mischzeit verlängert. Nach Verdoppelung der vorgegebenen

60 or 90 seconds or 2, 4, 7 or 10 minutes. The mixing time of 45 seconds was abandoned in the practical trial as it would no longer have been possible to make a clear separation of the fresh concrete samples released after mixing times of 30, 45 and 60 seconds.

The concrete composition corresponded to the laboratory trials. The aggregates and cement were taken from the silos, weighed and fed into the mixer. The mixing water was weighed in a storage container. The quantity corresponded to the total water content (154 kg/m³, w/c = 0.44) minus the inherent moisture content of the aggregate mix (which was determined daily before the start of the trial). The weighed air-entraining agent was added directly into the container with the mixing water, corresponding to the procedure in the laboratory trials. The mixing water was then added to the cement and aggregates in the mixer. The mixing time started when all the water had been added. For the single addition level the air-entraining agent was not included in the calculation of the water content. For the double and triple addition levels the quantity of air-entraining agent added was subtracted once or

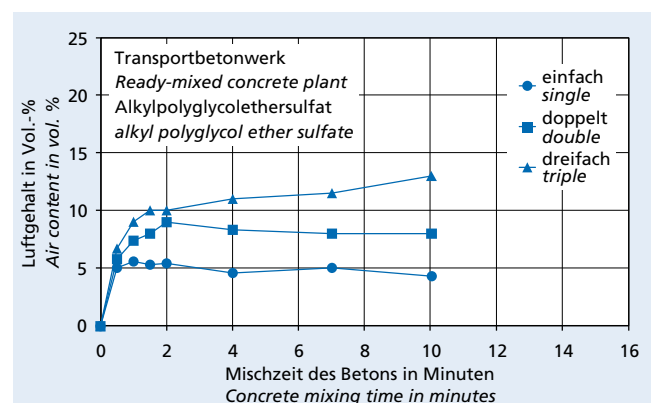
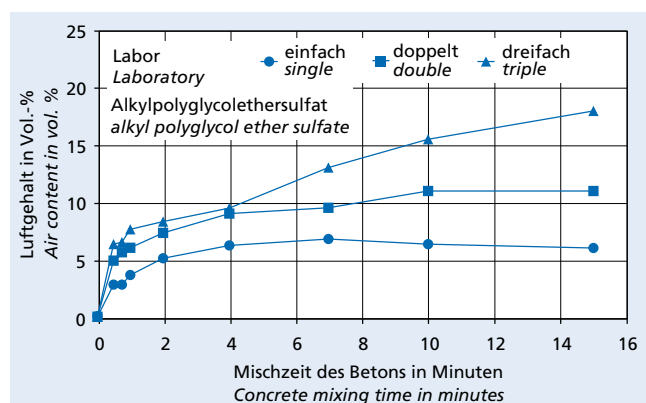
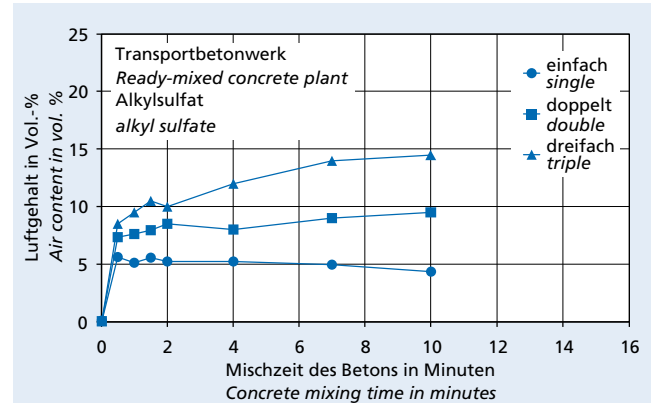
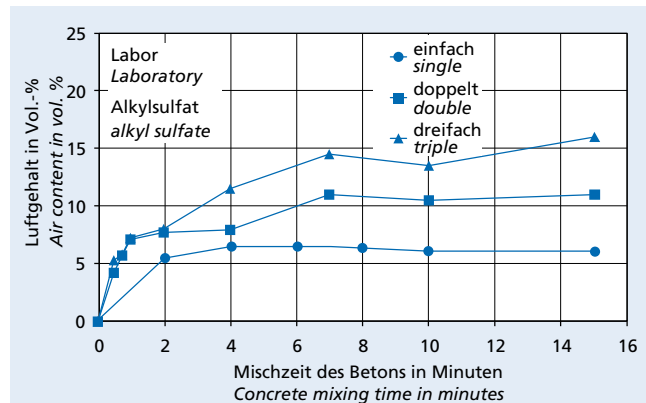
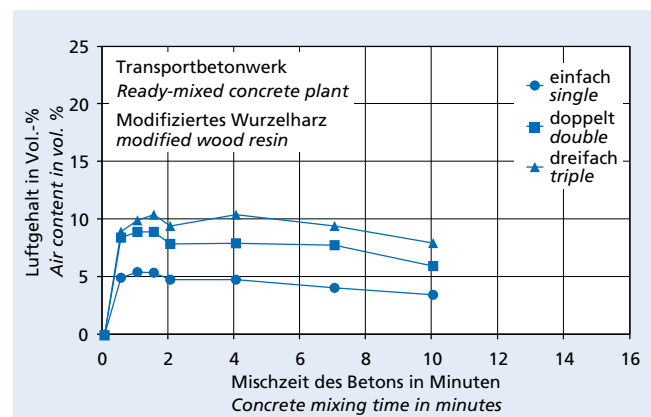
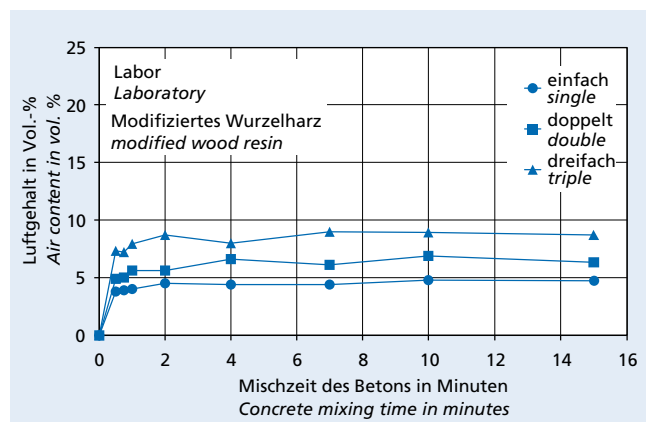


Bild 3: Luftgehalt des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Wirkstoffbasis und der Zugabemenge des LP-Bildners (links: Labor, rechts: Transportbetonwerk)

Figure 3: Air content of the fresh concrete in relation to the mixing time, the active substance and the amount of AEA added (left: laboratory, right: ready-mixed concrete plant)

Mischzeit von 30 auf 60 Sekunden, von 45 auf 90 Sekunden und von 60 auf 120 Sekunden wurde zusätzlich ein Würfel mit 150 mm Kantenlänge für die Bestimmung der LP-Kennwerte nach verlängerter Mischzeit hergestellt. Außerdem wurde rund 30 Minuten nach Mischzeitende die Konsistenz (Verdichtungsmaß) ermittelt.

Darüber hinaus wurden die Frischbetontemperatur nach Mischzeiten von 30 Sekunden und 10 Minuten und der Wassergehalt durch Darren einer Frischbetonprobe in der Mikrowelle nach [5] bestimmt. Die Probekörper für die Festbetonprüfungen sowie der LP-Topf und der Verdichtungskasten für die Frischbetonuntersuchungen wurden auf dem Rütteltisch des Transportbetonwerks verdichtet. Nach dem Verdichten wurden die Probekörper für die Festbetonuntersuchungen mit Folie und einem feuchten Jutetuch abgedeckt und im Werklabor gelagert. Jeweils am Morgen des nächsten Tages wurden die Probekörper in das FIZ transportiert, wo sie im Alter von rund 24 Stunden ausgeschalt und in die jeweiligen Lagerungen verbracht wurden. Die Lagerung und die Frisch- und Festbetonprüfungen entsprachen Abschnitt 3.2.1.4.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Laborversuche

4.1.1 Erstprüfung

Um den angestrebten Luftgehalt von rund 5 Vol.-% einzustellen, wurde beim LP-Bildner mit dem Wirkstoff Alkylpolyglycoether-

twice respectively from the mixing water to ensure the same w/c ratios for all three addition levels. 1.25 m³ fresh concrete were produced in each batch.

3.3.3 Initial testing

The addition levels for the air-entraining agents were determined on the basis of the mixing time curves in order to achieve a fresh concrete air content of 5.0 ± 0.5 vol. % after mixing times of 30 seconds (shorter mixing time than the minimum mixing time of 45 seconds specified in TL BetonStB [4]), 45 seconds (minimum mixing time) and 60 seconds (longer mixing time). When these values had been achieved the following test pieces were produced: three cubes (edge length 150 mm) for testing the 28-day compressive strength, one cube (edge length 150 mm) for determining the air void parameters and four slabs for testing the resistance to freeze-thaw with de-icing salt by the CDF method. The mixing time was also extended in these investigations. Cubes of 150 mm edge length for determining the air void parameters after extended mixing times were also produced after the predetermined mixing times had been doubled from 30 to 60 seconds, from 45 to 90 seconds and from 60 to 120 seconds. The consistency (compacting factor) was also determined about 30 minutes after the end of the mixing time.

Tafel 4: LP-Kennwerte am Festbeton in Abhängigkeit von der Wirkstoffart und Zugabemenge des LP-Bildners und der Mischzeit (Labor)

Table 4: Air void parameters in the hardened concrete in relation to the type of active substance in the air-entraining agent, the quantity of agent added and the mixing time (laboratory)

Wirkstoff LP-Bildner <i>Air-entraining agent active substance</i>	Kennwert Parameter		Zugabemenge Addition level	Mischzeit Mixing time			
				30 s	1 min	2 min	7 min
Modifiziertes Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	Luftporengehalt A <i>Air void content A</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	4,9	5,0	5,7	5,1
			Doppelt <i>Double</i>	6,2	6,5	6,4	6,7
	Mikroluftporen- gehalt A ₃₀₀ <i>Micro air void content A₃₀₀</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	2,0	2,1	2,7	2,8
			Doppelt <i>Double</i>	2,7	3,5	4,5	4,7
	Abstandsfaktor <i>Spacing factor</i>	mm	Einfach <i>Single</i>	0,19	0,15	0,13	0,12
			Doppelt <i>Double</i>	0,17	0,13	0,09	0,07
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfate</i>	Luftporengehalt A <i>Air void content A</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	4,8	6,2	5,9	7,5
			Doppelt <i>Double</i>	5,5	6,7	8,4	10,3
	Mikroluftporen- gehalt A ₃₀₀ <i>Micro air void content A₃₀₀</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	2,2	3,5	3,8	5,7
			Doppelt <i>Double</i>	2,4	4,2	5,6	7,4
	Abstandsfaktor <i>Spacing factor</i>	mm	Einfach <i>Single</i>	0,16	0,13	0,11	0,08
			Doppelt <i>Double</i>	0,18	0,12	0,09	0,06
Alkylpolygly- coethersulfat <i>Alkyl polygly- coether sulfate</i>	Luftporengehalt A <i>Air void content A</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	3,2	3,5	5,4	6,3
			Doppelt <i>Double</i>	5,5	6,2	7,1	9,9
	Mikroluftporen- gehalt A ₃₀₀ <i>Micro air void content A₃₀₀</i>	Vol.-%	Einfach <i>Single</i>	1,6	2,3	4,0	4,9
			Doppelt <i>Double</i>	3,4	4,3	5,5	7,5
	Abstandsfaktor <i>Spacing factor</i>	mm	Einfach <i>Single</i>	0,21	0,16	0,11	0,08
			Doppelt <i>Double</i>	0,13	0,12	0,08	0,06

Tafel 5: Kennwerte der Praxisversuche

Table 5: Parameters from the practical trials

Wirkstoff LP-Bildner <i>Airentaining agent active substance</i>	Mischzeit bei der Herstellung <i>Mixing time during production</i>	Zugabemenge LP-Bildner <i>Quantity of air-entraining agent added</i>	Verdichtungsmaß 30 Min. <i>Compaction factor 30 min</i>	Frischbetontemperatur ¹⁾ <i>Fresh concrete temperature¹⁾</i>	Wassergehalt gedarrt im Praxisversuch <i>Water content (dried) in practical trial</i>	Wassergehalt soll aus Laborversuchen ²⁾ <i>Water content (target) from laboratory trials²⁾</i>
	Sekunden <i>Seconds</i>	M.-% v.z <i>mass % w.r.t. cement</i>	–	°C	l/m ³	l/m ³
Modifiziertes Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	90	0,37 (1-fach) <i>(single)</i>	1,27	20,1	–	163
	90	0,74 (2-fach) <i>(double)</i>	1,27	22,1	158	163
	90	1,24 (3-fach) <i>(triple)</i>	1,24	22,2	158	163
	30	0,41 (5,6)	1,36	22,8	168	163
	45	0,37 (5,2)	1,40	23,7	165	163
	60	0,34 (5,1)	1,37	23,1	167	163
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfate</i>	90	0,27 (1-fach) <i>(single)</i>	1,38	22,1	165	162
	90	0,54 (2-fach) <i>(double)</i>	1,25	22,1	167	162
	90	0,81 (3-fach) <i>(triple)</i>	1,18	21,7	151	162
	30	0,30 (6,2)	1,36	22,7	165	162
	45	0,29 (5,6)	1,33	22,1	161	162
	60	0,27 (5,1)	1,38	22,1	–	162
Alkylpolyglycol-ethersulfat <i>Alkyl polyglycol ether sulfate</i>	90	0,42 (1-fach) <i>(single)</i>	1,38	22,7	170	163
	90	0,84 (2-fach) <i>(double)</i>	1,29	24,3	161	163
	90	1,26 (3-fach) <i>(triple)</i>	1,19	23,6	157	163
	30	0,42 (5,0)	1,38	22,7	170	163
	45	0,41 (4,6)	1,36	25,7	156	163
	60	0,40 (5,7)	1,41	25,5	168	163

¹⁾ Frischbetontemperatur nach 30 s, 45 s, 60 s bzw. 90 s Mischzeit (nach 10 min Mischzeit rund 3 °C bis 4 °C höher)

¹⁾ Fresh concrete temperature after 30 s, 45 s, 60 s or 90 s mixing time (about 3 °C to 4 °C higher after 10 min mixing time)

²⁾ Summe aus Eigenfeuchte/Kernfeuchte Gesteinskörnung: rund 0,40 M.-%: rund 8 l/m³, Zugabewasser 154 l/m³, LP rd. 1,5 kg/m³ = rd. 163 kg/m³

²⁾ Total of inherent moisture/core moisture of aggregate: approx. 0.40 mass %: approx. 8 l/m³, mixing water 154 l/m³, air-entraining agent approx. 1.5 kg/m³ = approx. 163 kg/m³

sulfat mit 0,47 M.-% die höchste Dosierung benötigt. Bei den anderen LP-Bildnern waren hierzu jeweils 0,30 M.-% erforderlich (Tafel 1). Bei Berücksichtigung der Wirkstoffmenge kehrt sich die Reihenfolge um. Die höchste Wirkstoff-Zugabemenge war beim natürlichen LP-Bildner (Wirkstoff modifiziertes Wurzelharz) erforderlich. Beim Alkylsulfat wurde eine mittlere und beim Alkylpolyglycolethersulfat die geringste Menge zugegeben. 30 Minuten nach dem Ende der Mischzeit betrug das Verdichtungsmaß 1,23 (Wurzelharz), 1,24 (Alkylsulfat) bzw. 1,27 (Alkylpolyglycolethersulfat), sodass bei zwei Betonen die angestrebte steife Konsistenz C1 ($v \geq 1,26$) geringfügig unterschritten und bei einem Beton erreicht wurde. Die Frischbetontemperatur betrug nach zwei Minuten Mischzeit rund 20 °C. Die 28-Tage-Druckfestigkeit und die LP-Kennwerte entsprachen den Anforderungen der TL Beton-StB 07. Die Betone wiesen mit Abwitterungen von rund 150 g/m² einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Es konnten keine LP-Bildner bedingten Abhängigkeiten festgestellt werden (Tafel 2).

4.1.2 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit (Labor)

a) Frischbeton

Bei einfacher Zugabemenge wurde der Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% nach zwei Minuten Mischzeit erreicht und veränderte sich danach nicht wesentlich (Bild 3 links). Die Frischbetontemperatur betrug nach zwei Minuten Mischzeit rund 20 °C und erhöhte sich nach

The fresh concrete temperature was measured after mixing times of 30 seconds and 10 minutes and the water content was determined by drying a fresh concrete sample in a microwave unit as described in [5]. The test pieces for the hardened concrete tests as well as the air void vessel and the compaction box for the fresh concrete investigations were compacted on the vibrating table at the ready-mixed concrete plant. After compaction the test pieces for the hardened concrete investigations were covered with film and a moist jute cloth and stored in the plant laboratory. In each case the test pieces were transported on the morning of the following day to the Research Institute of the Cement Industry where they were removed from the moulds at an age of about 24 hours and placed in their respective storage systems. The storage and the fresh and hardened concrete tests were carried out as described in Section 3.2.1.4.

4 Test results

4.1 Laboratory trials

4.1.1 Initial testing

The air-entraining agent containing the alkyl polyglycol ether sulfate active substance required the highest addition level of 0.47 mass % in order to achieve the required air content of about 5 vol. %. 0.3 mass % was needed for each of the other air-entraining agents (Table 1). The sequence was reversed when the quantity of active substance was considered. The highest addition level of

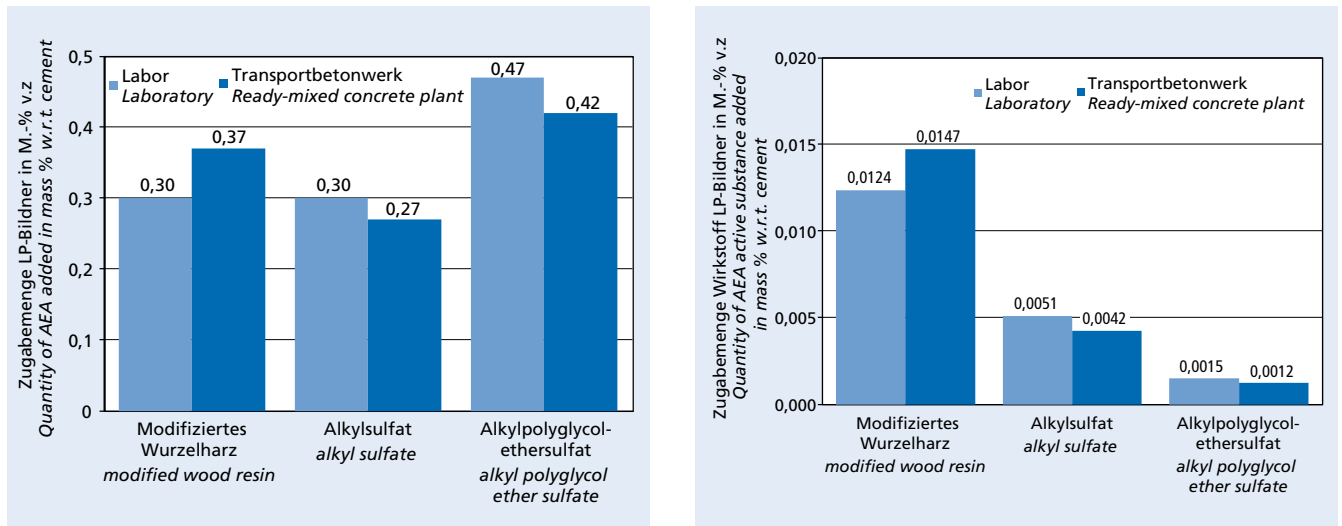


Bild 4: Zugabemenge LP-Bildner (links) bzw. LP-Bildner-Wirkstoff (rechts) im Labor bzw. im Transportbetonwerk zur Erzielung eines Luftgehalts von rund 5 Vol.-%

Figure 4: Quantities of air-entraining agent (left) and of air-entraining agent active substance (right) added in the laboratory and in the ready-mixed concrete plant to achieve an air content of approximately 5 vol. %

15-minütiger Mischzeit auf rund 22 °C. Unterschiede zwischen den drei LP-Bildnern traten nicht auf. Bei dreifacher Zugabemenge und verlängerter Mischzeit waren Unterschiede in Abhängigkeit des LP-Bildners zu erkennen. Der Luftgehalt stieg beim LP-Bildner auf natürlicher Wirkstoffbasis unterproportional auf nur rund 9 Vol.-% an. Nach 15 Minuten Mischzeit erhöhte sich der Luftgehalt beim LP-Bildner mit Alkylsulfat-Wirkstoffbasis auf 16 Vol. % und beim LP-Bildner mit der Wirkstoffbasis Alkylpolyglycolethersulfat auf 18 Vol.-% (Tafel 3).

b) Festbeton

Die LP-Kennwerte sind in Tafel 4 zusammengestellt. Nach Mischzeiten von einer Minute wurden die Anforderungen an die LP-Kennwerte (Abstandsfaktor $\leq 0,20$ mm, Mikroluftporengehalt $\geq 1,8$ Vol.-%) erfüllt. Bei kurzer Mischzeit von 30 Sekunden wurden die Kennwerte vereinzelt nicht eingehalten (LP-Bildner mit Wirkstoff Alkylpolyglycolethersulfat bei einfacher Zugabemenge: Abstandsfaktor 0,21 mm und Mikroluftporengehalt 1,6 Vol.-%). Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Gesamtluftge-

active substance was needed for the natural air-entraining agent (modified wood resin active substance). An intermediate amount of alkyl sulfate was needed while the smallest quantity was required for the alkyl polyglycol ether sulfate. The compacting factors 30 minutes after the end of the mixing time were 1.23 (wood resin), 1.24 (alkyl sulfate) and 1.27 (alkyl polyglycol ether sulfate) so for two concretes the value fell slightly below the stiff consistency C1 ($v \geq 1.26$) required and for one concrete it was achieved. After two minutes' mixing time the fresh concrete temperature was about 20 °C. The 28-day compressive strengths and the air void parameters met the requirements of TL Beton-StB 07. With scaling losses of about 150 g/m² the concretes exhibited a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt. No dependence on the particular air-entraining agent could be detected (Table 2).

4.1.2 Air void formation relative to mixing time

a) Fresh concrete

At the single addition level the air content of about 5 vol. % was achieved after two minutes' mixing time, after which there

Tafel 6: Festbetonkennwerte in der Praxis

Table 6: Hardened concrete parameters under practical conditions

Wirkstoff LP-Bildner Air-entraining agent active substance	Mischzeit bei der Herstellung Mixing time during production	Zugabemenge LP-Bildner Quantity of AEA added	Festbetonrohddichte Hardened concrete bulk density	28-Tage- Druckfestigkeit 28-day compres- sive strength	Abwitterung nach 28 FTW Scaling loss after 28 freeze-thaw cycles
	Sekunden Seconds	M.-% v.z. Mass % w.r.t. cement			
Modifiziertes Wurzelharz Modified wood resin	30	0,41 (5,6) ¹⁾	2,25	51,5	46
	45	0,37 (5,2)	2,28	57,5	62
	60	0,34 (5,1)	2,28	58,8	58
Alkylsulfat Alkyl sulfate	30	0,30 (6,2)	2,25	50,5	50
	45	0,29 (5,6)	2,24	50,6	62
	60	0,27 (5,1)	2,28	58,7	52
Alkylpolyglycol- ethersulfat Alkyl polyglycol ether sulfate	30	0,42 (5,0)	2,28	52,3	175
	45	0,41(4,6)	2,29	54,5	43
	60	0,40 (5,7)	2,27	53,3	45

¹⁾ Klammerwerte: Luftgehalt Frischbeton nach der jeweiligen Mischzeit bei der Herstellung

¹⁾ Figures in brackets: fresh concrete air content after the respective mixing time during production

Tafel 7: Luftporen-Kennwerte in Abhängigkeit von der Mischzeit (Praxis)
Table 7: Air void parameters in relation to the mixing time (practical conditions)

Wirkstoff LP-Bildner <i>Air-entraining agent active substance</i>	Abstandsfaktor in mm bei der Mischzeit von <i>Spacing factor in mm for mixing time of</i>		Mikroluftporengehalt in Vol.-% bei der Mischzeit von <i>Micro air void content in vol. % for mixing time of</i>		Luftgehalt in Vol.-% bei der Mischzeit von <i>Air content in vol. % for mixing time of</i>	
Modifiziertes Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	30 s	60 s	30 s	60 s	30 s	60 s
	0,11	0,13	2,4	2,4	4,5	6,0
	45 s	90 s	45 s	90 s	45 s	90 s
	0,09	0,17	2,9	1,8	4,5	4,8
	60 s	120 s	60 s	120 s	60 s	120 s
	0,11	0,11	2,4	1,8	4,6	3,5
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfate</i>	30 s	60 s	30 s	60 s	30 s	60 s
	0,10	0,12	3,7	2,8	5,0	4,9
	45 s	90 s	45 s	90 s	45 s	90 s
	0,11	0,12	3,1	2,4	4,8	4,1
	60 s	120 s	60 s	120 s	60 s	120 s
	0,12	0,13	2,4	2,0	4,3	4,6
Alkylpolyglycol- ethersulfat <i>Alkyl polyglycol ether sulfate</i>	30 s	60 s	30 s	60 s	30 s	60 s
	0,16	0,14	2,3	2,3	5,1	4,0
	45 s	90 s	45 s	90 s	45 s	90 s
	0,15	0,16	2,3	2,5	5,0	5,4
	60 s	120 s	60 s	120 s	60 s	120 s
	0,14	0,12	2,6	2,8	4,6	4,4

halt infolge kurzer Mischzeit nicht 5 Vol.-% sondern nur 3,2 Vol.-% betrug. Bei doppelter Zugabemenge und kurzer Mischzeit wurden die Kennwerte immer eingehalten. Der Anteil der Mikroluftporen am Gesamtluftgehalt stieg mit zunehmender Mischzeit an. Längere Mischzeiten bewirkten somit eine Verfeinerung des Luftporensystems.

4.2 Praxisversuche

4.2.1 Allgemeines

Zu Beginn des Versuchstages wurde die Zugabemenge LP-Bildner festgelegt, um bei der Mischzeit von 90 Sekunden den gewünschten Luftgehalt von $(5,0 \pm 0,5)$ Vol.-% zu erzielen. Anschließend wurde vormittags von ca. 9:00 Uhr bis 13:00 Uhr die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit einfacher, doppelter und dreifacher Zugabemenge ermittelt. Darauf folgten nachmittags bis ca. 17:00 Uhr die drei Erstprüfungen mit 30, 45 und 60 Sekunden Mischzeit. Bei den später hergestellten Betonen war an allen drei Tagen ein Anstieg der Frischbetontemperatur zu verzeichnen (Tafel 5). Die Zugabemengen LP-Bildner bzw. Wirkstoff zur Erzielung des Frischbetonluftgehalts von $(5,0 \pm 0,5)$ Vol.-% sind in Bild 4 dargestellt. Im Labor wurde beim LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis etwas mehr und bei den synthetischen LP-Bildnern etwas weniger Zusatzmittel als in der Praxis benötigt. Bei annähernd vergleichbaren Mischzeiten (Praxis: 90 Sekunden, Labor: 120 Sekunden) und LP-Bildner-Zugabe in das Zugabewasser wurden in Labor und Praxis vergleichbare Dosierungen benötigt. 30 Minuten nach Ende der Mischzeit betrug das Verdichtungsmaß bei einfacher Zugabemenge in Abhängigkeit des LP-Bildners beim modifizierten Wurzelharz zwischen 1,27 (20,1 °C) und 1,40 (23,7 °C), beim Alkylsulfat zwischen 1,33 (22,1 °C) und 1,38 (22,8 °C) und beim Alkylpolyglycolethersulfat zwischen 1,36 (25,7 °C) und 1,41 (25,5 °C). Infolge höherer Frischbetontemperatur steifte der Beton schneller an, sodass das Verdichtungsmaß i.d.R. anstieg. Bei zwei- und dreifacher Zugabemenge war aufgrund des höheren Luftgehalts eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit und damit verbunden eine Verringerung des Verdichtungsmaßes zu verzeichnen. Die im Mischwerk beim Darren mit der Mikrowelle ermittelten Wassergehalte stimmen gut mit Laborversuchen überein (Tafel 5). Die Betone beider Versuchsreihen wiesen somit vergleich-

was no substantial change (Fig. 3, left). After two minutes' mixing time the fresh concrete temperature was about 20 °C and after 15 minutes' mixing time it rose to about 22 °C. There were no differences between the three air-entraining agents. Differences between the air-entraining agents were detected with the triple addition level and extended mixing time. With the air-entraining agent based on natural active substances there was a disproportionately low increase in air content to only about 9 vol. %. With the air-entraining agent based on the alkyl sulfate active substance the air content rose to 16 vol. % after 15 minutes' mixing time and with the air-entraining agent based on the alkyl polyglycol ether sulfate active substance it rose to 18 % (Table 3).

b) Hardened concrete

The air void parameters are listed in Table 4. The air-void parameter requirements (spacing factor ≤ 0.20 mm, micro air void content ≥ 1.8 vol. %) were fulfilled after a mixing time of one minute. With a short mixing time of 30 seconds the parameters were not fulfilled in an individual instance (spacing factor 0.21 mm and micro air void content 1.6 vol. % with the air-entraining agent based on the alkyl polyglycol ether sulfate active substance at the single addition level). However, it must be borne in mind that as a consequence of the short mixing time the total air content was not 5 vol. % but only 3.2 vol. %. The parameters were fulfilled in all cases with the double addition level and short mixing time. The proportion of micro air voids in the total air content rose with increasing mixing time, i.e. longer mixing times produced finer air void systems.

4.2 Practical trials

4.2.1 General

The amount of air-entraining agent to be added to achieve the required air content of 5.0 ± 0.5 vol. % at a mixing time of 90 seconds was specified at the start of the trial day. The air void formation relative to mixing time was then determined with single, double and triple addition levels in the morning from about 9:00 to 13:00 hours. The three initial tests with mixing times of 30, 45 and 60 seconds then followed in the afternoon until about 17:00 hours. On all three days there was a rise in the fresh concrete temperature with the concretes that were produced later (Table 5). The addi-

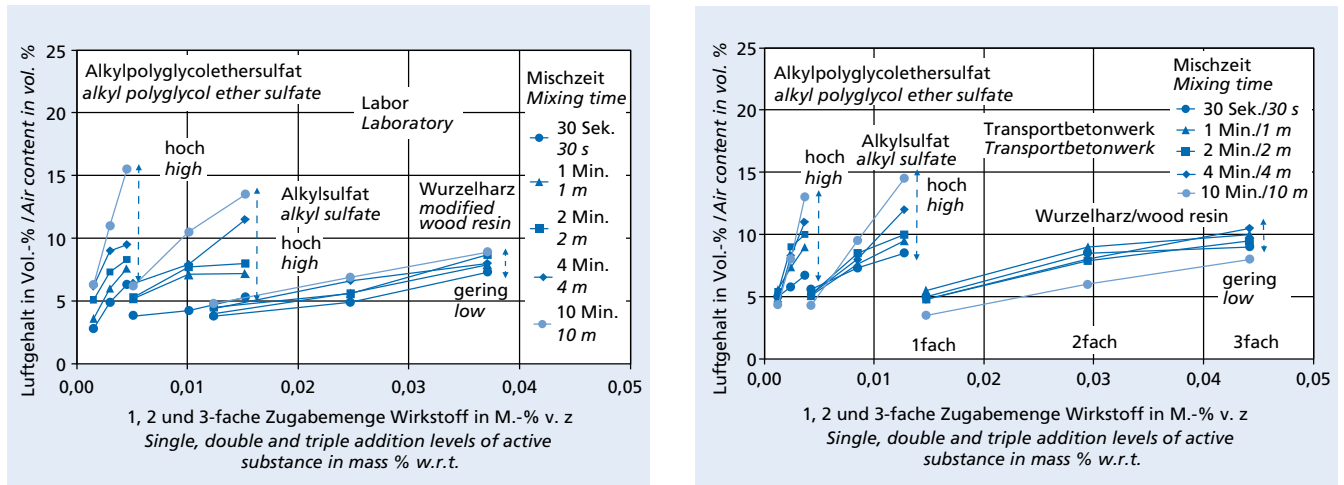


Bild 5: Luftgehalt in Abhängigkeit von der Wirkstoff-Zugabemenge des LP-Bildners und der Mischzeit im Labor (links) bzw. im Transportbetonwerk (rechts) sowie Einstufung des Nachaktivierungspotenzials (gering bzw. hoch)

Figure 5: Air content in relation to the quantity of air-entraining agent active substance added and the mixing time in the laboratory (left) and in the ready-mixed concrete plant (right), and classification of the re-activation potential (low or high)

bare Wassergehalte auf. Die bessere Verarbeitbarkeit der Laborbetone ist daher auf die höhere Frischbetontemperatur der Praxisbetone zurückzuführen.

4.2.2 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit (Praxis)

Bei einfacher Zugabemenge wurde der Luftgehalt von rund 5 Vol.-% bereits nach 30 Sekunden Mischzeit erreicht und veränderte sich danach kaum (s. Bild 3 und Tafel 3). Bei längeren Mischzeiten war bei den synthetischen LP-Bildnern und insbesondere beim natürlichen LP-Bildner ein leichter Abfall des Luftgehalts zu verzeichnen. Nennenswerte Unterschiede zwischen LP-Bildnern traten nicht auf. Bei überhöhter (2- und 3-facher) Zugabemenge und verlängerter Mischzeit waren LP-Bildner bedingte Unterschiede zu erkennen. Der Luftgehalt stieg beim LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis bei dreifacher Zugabemenge nach vier Minuten Mischzeit unterproportional auf rund 10 Vol.-% an und fiel danach auf rund 8 Vol.-% ab. Bei 3-facher Zugabemenge und zehn Minuten Mischzeit erhöhte sich der Luftgehalt beim LP-Bildner mit Alkylsulfat-Wirkstoffbasis auf 14,5 Vol.-% und beim LP-Bildner mit der Wirkstoffbasis Alkylpolyglycolethersulfat auf 13 Vol.-%. Dies war in den Laborversuchen umgekehrt: Alkylsulfat: 13,5 Vol.-% und Alkylpolyglycolethersulfat: 15,5 Vol.-%. Ursache hierfür war vermutlich die höhere Frischbetontemperatur der Praxisversuche, die eine steifere Konsistenz der Betone mit dem LP-Bildner der Wirkstoffbasis Alkylpolyglycolethersulfat bewirkte.

4.2.3 Erstprüfung

Bei Verlängerung der Mischzeit von 30 auf 45 bzw. 60 Sekunden konnte die Zugabemenge bei allen LP-Bildnern geringfügig reduziert werden (s. Tafel 5). Alle Betone wiesen mit Abwitterungen von maximal 175 g/m² einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Eine Verminderung des dynamischen E-Moduls wurde nicht festgestellt. Die 28-Tage-Druckfestigkeit von Labor- und Praxisbetonen war vergleichbar (Tafel 2 bzw. 6). Die LP-Kennwerte (Tafel 7) entsprachen bei allen Praxisbetonen auch nach kurzer Mischzeit von 30 Sekunden im Gegensatz zu den Laborbetonen den Anforderungen der TL Beton. Hinsichtlich der untersuchten Festbetonkennwerte waren keine durch den LP-Bildner bedingten Unterschiede feststellbar. Dies galt auch für den Einfluss der Mischzeit bei der Herstellung (30, 45 bzw. 60 Sekunden). Die Luftporenbildung in Labor und Praxis wies Unterschiede auf. Bei der kurzen Mischzeit von 30 Sekunden lagen die Praxis-Luftgehalte über den Werten der Laborversuche (Tafel 3). Bei einfacher Zugabemenge waren die Luftgehalte nach Mischzeiten von einer Minute in Labor und Praxis vergleichbar. Bei doppelter und dreifacher Zugabemenge waren für vergleichbare Luftgehalte im Labor längere Mischzeiten erforderlich. Diese Unterschiede sind

tion levels of air-entraining agents and active substances needed to achieve the fresh concrete air content of 5.0 ± 0.5 vol. % are shown in Fig. 4. Somewhat more of the air-entraining agent based on natural substances and somewhat less of the admixtures with the synthetic air-entraining agents were required in the laboratory than in the plant. At nearly comparable mixing times (plant: 90 seconds, laboratory: 120 seconds) and air-entraining agent addition in the mixing water comparable addition levels were required in the laboratory and in the plant. 30 minutes after the end of the mixing time the compacting factor at the single addition level lay, depending on the air-entraining agent, between 1.27 (20.1 °C) and 1.40 (23.7 °C) with the modified wood resin, between 1.33 (22.1 °C) and 1.38 (22.8 °C) with the alkyl sulfate and between 1.36 (25.7 °C) and 1.41 (25.5 °C) with the alkyl polyglycol ether sulfate. As a result of the higher fresh concrete temperature the concrete stiffened more rapidly with the result that, as a rule, the compacting factor rose. Because of the higher air content at the double and triple addition levels there was an improvement in workability with an associated reduction in the compacting factor. The water content determined in the mixing plant by drying in the microwave unit agreed well with the laboratory trials (Table 5). This means that the concretes from the two test series had comparable water contents. The better workability of the laboratory concretes is therefore due to the higher fresh concrete temperatures of the concretes prepared under practical conditions.

4.2.2 Air void formation relative to mixing time (plant)

At the single addition level the air content of about 5 vol. % was achieved after a mixing time of only 30 seconds, after which it hardly changed (see Fig. 3 and Table 3). Longer mixing times caused a slight drop in air content with the synthetic air-entraining agents and, in particular, with the natural air-entraining agent. There were no appreciable differences between the air-entraining agents. Differences due to the air-entraining agents could be detected at the excessive (double and triple) addition levels and extended mixing time. The rise in air content with the air-entraining agent based on natural active substances at the triple addition level was disproportionately low at about 10 vol. % after four minutes' mixing time, after which it dropped to about 8 vol. %. With the air-entraining agent based on the alkyl sulfate active substance with the triple addition level and ten minutes' mixing time the air content rose to 14.5 vol. % and with the air-entraining agent based on the alkyl polyglycol ether sulfate active substance it rose to 13 vol. %. This was reversed in the laboratory trials: alkyl sulfate 13.5 vol. % and alkyl polyglycol ether sulfate 15.5 vol. %. This was presumably due to the higher fresh concrete temperature in the practical trials that produced

vermutlich auf eine bessere Mischwirkung in der Praxis zurückzuführen.

4.3 Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus Labor und Praxis

4.3.1 Vorbemerkung

Um die Übertragbarkeit von Labor- auf Praxisverhältnisse zu gewährleisten, wurden in beiden Versuchsreihen möglichst vergleichbare Randbedingungen eingehalten. Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen sowie die Zugabeart des LP-Bildners wurden beibehalten. In Labor und Praxis wurden Tellermischer eingesetzt. Die Frischbetontemperatur von 20 °C konnte im Labor gleichmäßig eingehalten werden, während in der Praxis z.T. etwas höhere Frischbetontemperaturen verzeichnet wurden. Insbesondere die am Vormittag hergestellten Betone wiesen geringere Frischbetontemperaturen auf als die am Nachmittag hergestellten Betone.

4.3.2 Mischzeitabhängige Luftporenbildung im Frischbeton

Die Luftporenbildung im Labor und im Transportbetonwerk wies mischzeitabhängige Unterschiede auf. Bei der Mischzeit von 30 Sekunden lagen die Luftgehalte in der Praxis über den Werten der Laborversuche (s. Tafel 3, Bild 3). Bei einfacher Zugabemenge waren die Luftgehalte nach Mischzeiten von einer Minute in Labor und Praxis vergleichbar. Bei doppelter und dreifacher Zugabemenge waren für vergleichbare Luftgehalte im Labor längere Mischzeiten erforderlich. Dies traf für alle LP-Bildner-Wirkstoffe zu. Ursache ist vermutlich die bessere Mischintensität des Praxismischers. Die LP-Bildner-Moleküle werden hierdurch schneller an die Luftblasen angelagert und das Luftporensystem wird in kürzerer Mischzeit aufgebaut.

4.3.3 Nachaktivierungspotenzial

Zum Vergleich der Luftporenbildung in Labor und Praxis wurden die Luftgehalte in Abhängigkeit der Wirkstoff-Zugabemenge des LP-Bildners und der Mischzeit dargestellt (Bild 5). Bei einfacher Zugabemenge ist kein Einfluss des LP-Bildners zu erkennen. Bei 2- und 3-facher Zugabemenge zeigt sich ein wirkstoffabhängiges Verhalten. Beim natürlichen LP-Bildner auf Wurzelharzbasis stieg der Luftgehalt bei dreifacher Zugabemenge auf max. 10 Vol.-% und bei den synthetischen LP-Bildnern auf über 15 Vol.-% an. LP-Bildner auf Wurzelharzbasis haben ein geringes Nachaktivierungspotenzial, da auch bei hohen Dosierungen der größte Anteil des Wirkstoffs in der Porenlösung ausfällt. Synthetische LP-Bildner sind gut löslich, sie weisen daher ein höheres Nachaktivierungspotenzial auf. Es sind auch wesentlich geringere Wirkstoffmengen zur Erreichung des angestrebten Luftgehalts erforderlich. Die Bilder zeigen, dass das in der Erstprüfung ermittelte Nachaktivierungspotenzial auch unter Praxisbedingungen erhalten bleibt.

4.3.4 Festbetonparameter

Druckfestigkeit und Frost-Tausalz-Widerstand von Labor- und Praxisbetonen waren vergleichbar. In der Praxis wurden insbesondere bei kurzer Mischzeit etwas bessere LP-Kennwerte als im Labor erzielt. Dies liegt vermutlich an der besseren Mischwirkung des Praxismischers im Vergleich zum Labormischer. Dies bestätigt die Ergebnisse zur Luftporenbildung am Frischbeton.

4.3.5 Übertragbarkeit von Labor- auf Praxisbedingungen

Die im Labor ermittelten Abhängigkeiten treten auch in der Praxis auf. Die Wirkungsweise des LP-Bildners und das zu erwartende Nachaktivierungspotenzial kann mit Laborversuchen abgeschätzt werden. Die in [5, 6] beschriebene erweiterte Erstprüfung mit der Ermittlung der mischzeitabhängigen Luftporenbildung mit normaler und überhöhter LP-Bildner-Dosierung nach kurzer und verlängerter Mischzeit (Bild 1) ist geeignet, um das Nachaktivierungspotenzial eines Betons bereits im Rahmen der Erstprüfung zu kennzeichnen. In der Praxis wurde infolge der höheren Mischintensität im Vergleich zum Labor eine effektivere Luftporenbildung festgestellt.

a stiffer consistency in the concretes made with the air-entraining agent based on the alkyl polyglycol ether sulfate active substance.

4.2.3 Initial testing

When the mixing time was extended from 30 to 45 and 60 seconds it was possible to make a slight reduction in the quantity of all three air-entraining agents (see Table 5). All the concretes exhibited high resistance to freeze-thaw with de-icing salt with maximum scaling losses of 175 g/m². No reduction in the dynamic elastic modulus was observed. The 28-day compressive strengths of the laboratory and plant concretes were comparable (Tables 2 and 6). In contrast to the laboratory concretes the air void parameters (Table 7) of all the plant concretes met the requirements of TL Beton, even after the short mixing time of 30 seconds. No differences due to the air-entraining agents were found in the hardened concrete parameters investigated. This also applied to the influence of the mixing time during production (30, 45 or 60 seconds). The air void formation in the laboratory and in the practical trials did exhibit some differences. At the short mixing time of 30 seconds the air contents obtained in the plant were higher than the values from the laboratory trials (Table 3). At the single addition level the air contents in the laboratory and in the practical trials after a mixing time of one minute were comparable. At the double and triple addition levels longer mixing times were required in the laboratory to achieve comparable air contents. These differences are presumably due to the better mixing effect in the practical trials.

4.3 Comparison of the test results from the laboratory and the plant

4.3.1 Preliminary comment

To ensure transferability from laboratory to practical conditions the marginal conditions in the two test series were, as far as possible, kept comparable. Starting materials and concrete compositions as well as the way the air-entraining agents were added were kept the same. Pan mixers were used in the laboratory and in the practical trial. In the laboratory the fresh concrete temperature was kept consistently at 20 °C while somewhat higher fresh concrete temperatures were recorded in some cases in the plant. In particular, the concretes produced in the mornings had lower fresh concrete temperatures than the concretes produced in the afternoons.

4.3.2 Air void formation in fresh concrete relative to mixing time

The air void formation in the laboratory and in the ready-mixed concrete plant exhibited differences relative to the mixing times. At a mixing time of 30 seconds the air contents obtained in the practical trials were higher than the values from the laboratory trials (see Table 3, Fig. 3). At the single addition level the air contents after a mixing time of one minute were comparable in the laboratory and the plant. At the double and triple addition levels longer mixing times were needed in the laboratory to achieve comparable air contents. This applied to all the active substances used in the air-entraining agents. The reason is presumably the better mixing intensity of the plant mixer. This causes the air-entraining agent molecules to become attached more rapidly to the air bubbles so that the air void system is formed in a shorter mixing time.

4.3.3 Re-activation potential

The air content was plotted against the addition level of active substance in the air-entraining agent and the mixing time (Fig. 5) in order to compare the air void formation in the laboratory and under practical conditions. The air-entraining agent has no detectable influence at the single addition level. At the double and triple addition levels there is a behaviour pattern that depends on the active substance. The air content at the triple addition level rose to a maximum of 10 vol. % with the natural air-entraining agent based on wood resin while with the synthetic air-entraining agents it rose to over 15 vol. %. Air-entraining agents based on wood resin have a low re-activation potential because even at high addition levels most of the active substance is precipitated in the pore solution. Synthetic air-entraining agents are highly soluble so they exhibit a higher re-activation potential. Substantially smaller quantities of

5 Zusammenfassung

In dem Forschungsvorhaben wurde untersucht, ob der in Laborversuchen gefundene Einfluss von Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auf das Nachaktivierungspotenzial auch unter Praxisverhältnissen bei der Herstellung von LP-Beton in einer Transportbeton- oder Baustellenmischanlage erhalten bleibt. Hierzu wurden drei LP-Bildner mit unterschiedlichem Nachaktivierungspotenzial ausgewählt. Anschließend wurde die mischzeitabhängige LP-Bildung am Frisch- und Festbeton im Labor und in der Praxis mit vergleichbaren Ausgangsstoffen und Betonzusammensetzungen ermittelt. Druckfestigkeit und Frost-Tausalz-Widerstand der Labor- und Praxisbetone waren vergleichbar. Zur Erreichung des angestrebten Luftgehalts von rund 5 Vol.-% wurden in beiden Versuchsreihen vergleichbare LP-Bildner-Dosierungen benötigt. Mit Ausnahme der Mischzeit von 30 Sekunden war die mischzeitabhängige Luftporenbildung in Labor und Praxis vergleichbar. In der Praxis wurde der angestrebte Luftgehalt von 5 Vol.-% nach Mischzeiten von 30 Sekunden erreicht. Hierzu waren im Labormaßstab längere Mischzeiten erforderlich. Ursache ist vermutlich die bessere Mischintensität des Praxismischers, wodurch die LP-Bildner-Moleküle schneller an die Luftblasen angelagert und das Luftporensystem in kürzerer Mischzeit aufgebaut wird. Dies zeigte sich auch bei den LP-Kennwerten. Insbesondere bei kurzer Mischzeit wurden in der Praxis geringere Abstandsfaktoren und höhere Mikroluftporengehalte als im Labor bestimmt. Die Ergebnisse der Laborversuche sind auf die Praxis übertragbar. Die im Vorschriftenwerk beschriebene Vorgehensweise mit der Ermittlung der mischzeitabhängigen Luftporenbildung mit „normaler“ und überhöhter LP-Bildner-Zugabemenge nach kurzer und verlängerter Mischzeit ist geeignet, um die Wirkungsweise eines LP-Bildners und das zu erwartende Nachaktivierungspotenzial eines Betons im Rahmen der Erstprüfung zu kennzeichnen.

Das IGF-Vorhaben 17227 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH 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 Bundestages gefördert.

Literatur / Literature

- [1] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 73, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 2009
- [2] DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [3] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [4] Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. TL Beton-StB 07, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau
- [5] Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. TP Beton-StB 10, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau
- [6] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004
- [7] Beitzel, H.: Gesetzmäßigkeiten zur Optimierung von Betonmischern. BMT (1981) H. 11 und H. 12, S. 586–602 und S. 641–647
- [8] Sika Betonhandbuch, Ausgabe 2004
- [9] Frenking, H.: Kriterien für die Beurteilung der Gleichmäßigkeit des Mischguts. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 274, 1979, Herausgeber Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg
- [10] Beitzel, H.: Einfluss der Mischdauer auf die Gleichmäßigkeit der Mischeigenschaften bei Betonmischern für Straßenbeton. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 274, 1979, Herausgeber Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg

active substance are needed to achieve the required air content. The diagrams show that the re-activation potential determined in the initial testing remains the same under practical conditions.

4.3.4 Hardened concrete parameters

The laboratory and plant concretes had comparable compressive strengths and resistance to freeze-thaw with de-icing salt. Somewhat better air void parameters were achieved under practical conditions than in the laboratory, especially with the short mixing time. This is presumably due to the better mixing effect in the plant mixer than in the laboratory mixer. This supports the results on air void formation in fresh concrete.

4.3.5 Applicability of laboratory conditions to practical conditions

The relationships determined in the laboratory also occur under practical conditions. The mode of operation of the air-entraining agent and the expected re-activation potential can be estimated with laboratory trials. The extended initial testing described in [5, 6] with determination of air void formation relative to mixing time with normal and excessive addition levels of air-entraining agent after short and extended mixing times (Fig. 1) is suitable for characterizing the re-activation potential of a concrete during the initial testing. A more effective air void formation was established in the plant as a result of the greater mixing intensity when compared with the laboratory.

5 Summary

The research project examined whether the influence of the mixing time, the basis of the active substance in the air-entraining agent and the quantity of agent added on the re-activation potential found in laboratory trials also holds true under practical conditions during the production of air-entrained concrete in a ready-mixed concrete plant or construction site mixing plant. Three air entraining agents with different re-activation potentials were chosen for this purpose. The air void formation in the fresh and hardened concrete relative to the mixing time was then determined in the laboratory and under practical conditions using comparable starting materials and concrete compositions. The compressive strength and resistance to freeze-thaw with de-icing salt of the laboratory and practical concretes were comparable. Comparable addition levels of air-entraining agent were needed in the two test series to achieve the required air content of approximately 5 vol. %. With the exception of the 30 second mixing time the air void formation relative to the mixing time was comparable in the laboratory and in practice. Under practical conditions the required air content of 5 vol. % was achieved after a mixing time of 30 seconds while longer mixing times were needed in the laboratory. The reason is presumably the better mixing intensity of the practical mixer so that the molecules of the air-entraining agent become attached more rapidly to the air bubbles and the air void system is established in a shorter mixing time. This is also apparent in the air void parameters. The spacing factors were lower and the micro air void contents were higher under practical conditions than in the laboratory, especially at short mixing times. The results of the laboratory trials can be applied to practical conditions. The procedure described in the instructions for determining the air void formation in relation to mixing time with “normal” and excessive addition levels of air-entraining agent after short and extended mixing times during the initial testing is suitable for characterizing the functioning of an air-entraining agent and the anticipated re-activation potential of a concrete.

IGF Project 17227 of the VDZ gGmbH Research Association was sponsored 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 based on a decision by the German Federal Parliament.

Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf, Carl-Alexander Graubner, Tilo Proske, Stefan Hainer, Moien Rezvani, Darmstadt, Winfried Neufert, Ines Reuken, Erwitte

Zemente mit hohen Kalksteingehalten – Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit

Cements with a high limestone content – durability and practicability

Inhaltsübersicht

Ziel des dargestellten Forschungsvorhabens war die labor- und werkseitige Herstellung und Prüfung von Zementen mit Kalksteingehalten jenseits der in DIN EN 197-1 beschriebenen Maximalgehalte. Es wurden Kalksteingehalte zwischen 30 M.-% und 70 M.-%, bezogen auf den sulfatträgerhaltigen Zement, verwendet. Die Auswirkung der Klinkerreduzierung im Zement in Abhängigkeit der Eigenschaften des Kalksteins als weiterem Hauptbestandteil auf die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit von Beton wurde untersucht. Im Zentrum stand die Frage, inwieweit den Auswirkungen der Klinkersubstitution im Zement durch Optimierung der Korngrößen- und Komponentenverteilung sowie der Anpassung der Betontechnologie unter Laborbedingungen und unter praxisnahen Bedingungen begegnet werden kann.

Zusammenfassend kann zum jetzigen Zeitpunkt festgestellt werden, dass für die Herstellung und Verwendung kalksteinreicher Zemente (bis 50 M.-% LL) anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle beton-technologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung erforderlich wären. Werden diese Maßnahmen unter Praxisbedingungen beherrscht, können zulassungsfähige Dauerhaftigkeitskennwerte am Beton erzielt werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf einer weiteren Absicherung. Kriechen und Schwinden solcher Betone müssen weiter untersucht werden. Der Einfluss der Kalksteinqualität auf das Ergebnis von Frostversuchen bedarf ebenfalls einer weiteren Absicherung.

Durch die effiziente Ausnutzung des Portlandzementklinkers in Zementen mit hohen Kalksteingehalten könnten die Werte einer Ökobilanz verbessert werden. In der Bilanzierung von Betonen mit niedrigeren Wasserzementwerten mit den kalksteinreichen Zementen liegt das Treibhauspotenzial bei gleicher Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit im Labor) rd. 25 % unter dem Treibhauspotenzial eines Betons mit CEM II/A-LL bzw. dem Durchschnittszement der VDZ-EPD.

1 Einleitung

Die Zementindustrie setzt weltweit ca. 5 % der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen frei. Ein Weg, den CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Zement und Beton zu begrenzen, wird in der zunehmenden Herstellung und Anwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen gesehen. Mit der effizienten Nutzung des Portlandzementklinkers im Zement sinken die Gesamtemissionen von CO₂ pro Tonne Zement. Ein Problem besteht darin, dass die reaktiven Hauptbestandteile Hütensand und Steinkohlenflugasche nur in begrenztem Maße vorhanden sind und bereits jetzt in Deutschland praktisch eine vollständige Verwertung dieser Stoffe erfolgt. Daher wäre auf dem Wege der Erhöhung des Anteils an CEM III, bzw. an CEM II-S und CEM II-V Zementen zukünftig keine weitere signifikante Verbesserung der Umweltwirkung einer Tonne Zement bzw. eines Kubikmeters Beton mehr möglich. Kalkstein kann dagegen sowohl in nahezu beliebiger Menge als auch kostengünstig bereitge-

Abstract

The aim of this research project was to produce and test, both in the laboratory and in the plant, cements containing levels of limestone beyond the maximum levels described in DIN EN 197-1. Limestone levels between 30 mass % and 70 mass %, relative to the cement including the sulfate agent, were used. The effect of reducing the clinker in the cement on the strength development and durability of the concrete was examined in relation to the properties of the limestone used as a further main constituent. The investigation focused on the extent to which the effect of replacing the clinker in the cement can be countered by optimizing the particle size and component distributions and adapting the concrete technology under laboratory and practical conditions.

At the moment the situation can be summarized by stating that sophisticated process engineering measures in the cement plant and equally sophisticated concrete technology measures (low-water concrete with appropriate addition levels of admixtures) in the concrete production would be necessary for the production and use of high-limestone cements (up to 50 mass % LL). If these measures can be implemented under practical conditions then it will be possible for the concrete to achieve durability parameters that can meet the approval requirements. The robustness of these systems in construction work requires further verification. The creep and shrinkage of such concretes must be investigated in greater depth and the influence of the limestone quality on the results of freeze-thaw tests also requires further verification.

The ecological balance values could be further improved by efficient utilization of the Portland cement clinker in cements containing high levels of limestone. In the balances drawn up for concretes with fairly low water/cement ratios using high-limestone cements the global warming potential for the same effectiveness (compressive strength and durability in the laboratory) is about 25 % lower than the global warming potential of a concrete made with CEM II/A-LL cement or with the average cement from the VDZ-EPD.

1 Introduction

The cement industry throughout the world releases about 5 % of the carbon dioxide emissions caused by man. One way of limiting the discharge of CO₂ during the production of cement and concrete lies in the increasing production and use of cements containing several main constituents. The total emission of CO₂ per tonne of cement falls with efficient utilization of the Portland cement clinker in the cement. One problem is that two of the reactive main constituents, namely granulated blastfurnace slag and fly ash from bituminous coal, are only available in limited quantities and in Germany these materials are already practically fully utilized. It would therefore not be possible to make any further significant improvement in the environmental impact of a tonne of cement or a cubic metre of concrete in future by raising the proportion of CEM III or of CEM II-S and CEM II-V cements. Limestone, on the other hand, is available inexpensively and in nearly any quantity required. However, it is an inert ma-

Tafel 1: Charakterisierung der Kalksteine aus den Provenienzen 1 bis 3
 Table 1: Characterization of the limestone from provenances 1 to 3

	LL1	LL2	LL3-1	LL3-2	LL3-3
CaCO ₃ -Gehalt in M.-% CaCO ₃ content in mass %	98	88	75	75	75
TOC in M.-% / mass %	0,02	0,05	0,1	0,1	0,1
Methylenblauwert in g/100g Methylene blue value in g/100 g	0,03	0,50	0,60	0,40	0,40
Feinheit nach Blaine in cm ² /g Blaine fineness in cm ² /g	4200	4200	8000	5000	2700
RRSB Steigungsmaß n RRSB slope n	0,8	0,9	0,7	0,7	0,6
RRSB Lageparameter d' in µm RRSB position parameter d' in µm	20	20	10	25	40

stellt werden. Allerdings handelt es sich um ein Inertmaterial. Eine deutliche Erhöhung seines Anteils im Zement ist entsprechend aufgrund der normativ festgelegten Randbedingungen verbunden mit dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand nicht ohne weiteres möglich. Zudem muss ggf. nach der Kalksteinqualität differenziert werden.

Die grundlegende Idee des Forschungsvorhabens war die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Bereich der hochfesten und ultrahochfesten Betone auf übliche Konstruktionsbetone. Dabei wurde durch eine Modifikation der derzeit gängigen betontechnologischen Randbedingungen, insbesondere durch die Verringerung des Wasserzementwerts, das Verhältnis von Klinker zu Kalkstein im Zement weiter reduziert.

2 Versuche und Ergebnisse

2.1 Zemente und Zementhauptbestandteile

Es wurden je ein CEM I 42,5 N, CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R als Referenzzement verwendet. Die Prüfzemente wurden durch getrennte Mahlung und anschließendes Mischen eines CEM I 52,5 R und verschiedenen Kalksteinqualitäten (Tafel 1) hergestellt. Für die Mörtelversuche erfolgte das Mischen der Komponenten im Labor. Für die Betonversuche wurden werkseitig produzierte Zemente verwendet. Da sich in der Gesamtschau der Versuche gezeigt hat, dass 50 M.-% Kalk-

stein. This means that its proportion in cement cannot readily be increased significantly because of the conditions specified in the standards combined with the current lack of knowledge. It may also be necessary to differentiate between different grades of limestone.

The basic idea of the research project was to transfer the findings from the field of high-strength and ultra-high-strength concretes to normal structural concrete. The ratio of clinker to limestone in the cement was further reduced by modifying the current concrete technology constraints, in particular by reducing the water/cement ratio.

2 Trials and results

2.1 Cements and cement main constituents

CEM I 42,5 N, CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R cements were used as reference cements. The test cements were produced by separate grinding and subsequent mixing of a CEM I 52,5 R cement and various grades of limestone (Table 1). For the mortar trials the components were mixed in the laboratory but cements produced in the plant were used for the concrete trials. In the overview of the trials it became apparent that 50 mass % limestone in the cement represents a critical limit up to which it is still possible, by using appropriate sophisticated concrete technology, to produce durable concretes in the laboratory, so the results obtained with this limestone content are

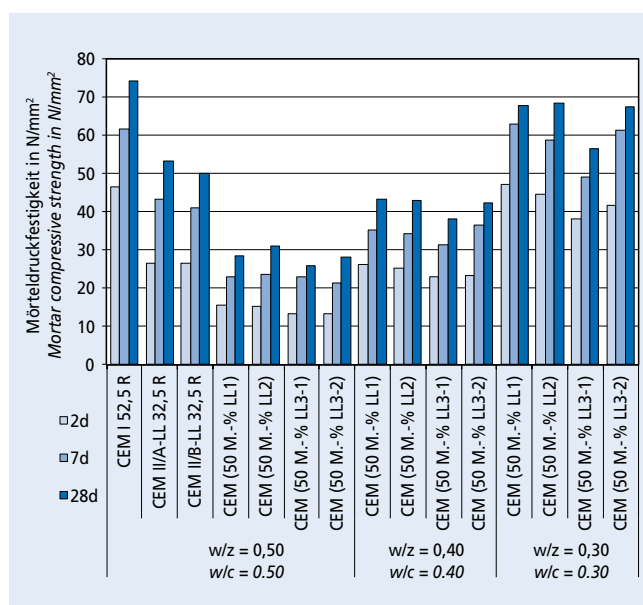


Bild 1: Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit Laborzementen mit 50 M.-% LL

Figure 1: Strength development of mortars made with laboratory cements containing 50 mass % LL

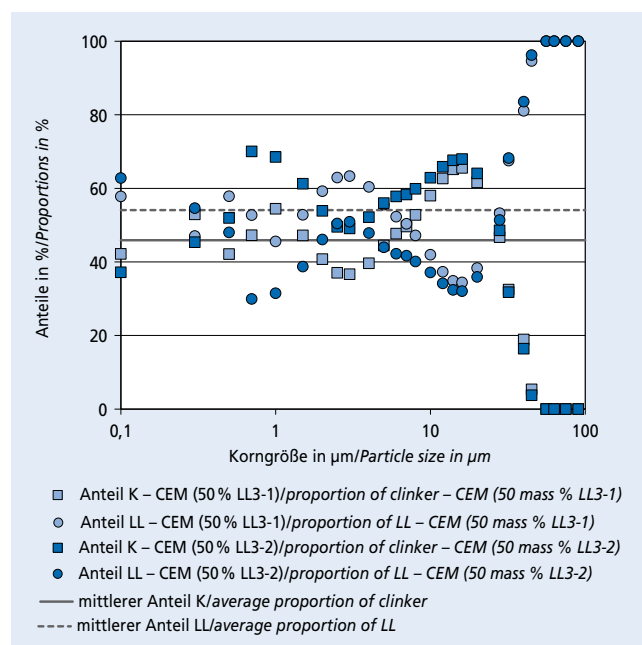


Bild 2: Kombinierte Korngrößen- und Komponentenverteilung
 Figure 2: Combined particle size and component distributions

Tafel 2: Betonzusammensetzungen
Table 2: Concrete compositions

	Beton B3 Concrete B3	Beton B4 Concrete B4	Beton B5 Concrete B5
Zementgehalt in kg/m ³ Cement content in kg/m ³	320	335	380
Wasserzementwert Water/cement ratio	0,50	0,45	0,35
Leimgehalt inkl. Gesteinskörnungs- anteil <125 µm in l/m ³ Paste content, incl. aggregate fraction <125 µm, in l/m ³	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5

stein im Zement eine kritische Grenze darstellt, bis zu der man mit einer angepassten, anspruchsvollen Betontechnologie noch dauerhafte Betone im Labor erzeugen kann, werden im Folgenden die Ergebnisse mit diesem Kalksteingehalt dargestellt. Ergebnisse mit 30 M.-%, 35 M.-%, 65 M.-% und 70 M.-% Kalkstein stehen im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens ebenfalls zur Verfügung.

2.2 Mörtелеigenschaften

Die Druckfestigkeit sowohl von Normmörteln als auch von Mörteln mit abweichenden Zementgehalten und Wasserzementwerten wurde nach 2, 7 und 28 Tagen gemäß DIN EN 196-1 geprüft. Normmörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden gemäß DIN EN 196-1 prinzipiell ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 490 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit $w/z = 0,30$ mit 560 g je Mischung. Es wurde ein PCE-basiertes Fließmittel verwendet, um ein konstantes Ausbreitmaß von 130 ± 5 mm zu erzielen.

In Bild 1 ist zu erkennen, dass der Laborzement mit Kalkstein LL3-2 ähnliche Druckfestigkeiten wie die Zemente mit den Kalksteinen LL1 und LL2 und damit deutlich höhere Festigkeiten als der Zement mit LL3-1 aufweist. Bei den Kalksteinen LL3-1 und LL3-2 handelte es sich um Kalkstein aus der gleichen Provenienz in veränderter Granulometrie. Die Festigkeitsentwicklung bei Verwendung hoher Kalksteingehalte außerhalb der in DIN EN 197-1 festgelegten Maximalgehalte hing hier also weniger von der chemischen Zusammensetzung des Kalksteins, sondern vielmehr von den Korngrößen- und Komponentenverteilungen der Zementhauptbestandteile ab.

Eine beispielhafte Korngrößenabhängige Komponentenverteilung zeigt Bild 2. Es wurde für beide Zemente jeweils die gleiche Klinkerkomponente verwendet. Auf der y-Achse ist der Anteil der Zementhauptbestandteile Klinker und Kalkstein der Zemente mit 50 M.-% Kalkstein LL3-1 bzw. LL3-2 in Abhängigkeit der Korngröße dargestellt. Den mittleren Volumenanteil der Komponenten bezogen auf den gesamten Zement zeigen die Geraden bei 46 Vol.-% Klinker bzw. 54 Vol.-% Kalkstein. Bis zu einer Korngröße von etwa 30 µm liegt der Klinkeranteil des Zementes mit LL3-2 deutlich über den im Gesamtsystem enthaltenen 46 Vol.-%, während der Klinker im Zement mit LL3-1 in diesem Korngrößenbereich etwa im Bereich des genannten Mittelwerts liegt. Insbesondere auch im Bereich bis 10 µm, der maßgeblich für die Entwicklung der Frühfestigkeit ist, weist der Zement mit LL3-2 deutlich höhere Klinkeranteile bis etwa 70 Vol.-% auf. Die Vernetzung der Hydrationsprodukte in den Korngrößenbereichen bis 10 µm bzw. bis 30 µm wird bei Verwendung des Kalksteins LL3-2 deutlich weniger durch Inertpartikel gestört. Somit kann sich bei ansonsten gleichen Ausgangsbedingungen eine deutlich höhere Festigkeit zu allen Prüfterminen entwickeln. Es ist also von ent-

described below. The results obtained with 30 mass %, 35 mass %, 65 mass % and 70 mass % limestone are available in the final report on the research project.

2.2 Mortar properties

The compressive strengths of both standard mortars and of mortars made with cement contents and water/cement ratios deviating from the standard were tested after 2, 7 and 28 days as specified in DIN EN 196-1. Standard mortars with a water/cement ratio of $w/c = 0.50$ were produced in accordance with DIN EN 196-1 with a cement content of 450 g per mix, in principle without the use of superplasticizers. Mortars with a water/cement ratio of $w/c = 0.40$ were produced with a cement content of 490 g per mix and mortars with $w/c = 0.30$ were produced with a cement content of 560 g per mix in order to maintain a constant paste content. A PCE-based superplasticizer was used to achieve a constant flow table spread of 130 ± 5 mm.

It can be seen from Fig. 1 that the laboratory cement made with LL3-2 limestone had compressive strengths similar to those of the cements made with LL1 and LL2 limestones and significantly higher strengths than the cements made with LL3-1. LL3-1 and LL3-2 are limestones of the same provenance but with different granulometries. This means that the strength development when using high levels of limestone beyond the maximum levels specified in DIN EN 197-1 is dependent less on the chemical composition of the limestone than on the particle size and component distributions of the main cement constituents.

Fig. 2 shows an example of component distribution in relation to particle size. The same clinker components were used for both cements. The proportions of the main cement constituents, namely clinker and limestone, in the cements containing 50 mass % of the LL3-1 or LL3-2 limestone are shown on the y-axis in relation to the particle size. The straight lines at 46 vol. % clinker and 54 vol. % limestone show the average volumetric proportions relative to the complete cement. Up to a particle size of about 30 µm the proportion of clinker in the cement containing LL3-2 is significantly higher than the 46 vol. % contained in the overall system while in this particle size range the clinker in the cement containing LL3-1 lies in about the same range as the above-mentioned average value. In particular, the cement containing LL3-2 has significantly higher proportions of clinker of up to about 70 vol. % in the size range to 10 µm that is crucial for the development of the early strength. The interlinking of the hydration products in the particle size ranges up to 10 µm and 30 µm is significantly less disrupted by inert particles when LL3-2 limestone is used. This means that a significantly higher strength can develop on all test dates under otherwise identical starting conditions. It is therefore of crucial importance that the particle size distributions of all the main constituents in the cement are carefully matched to one another.

2.3 Concrete trials

Plant cements produced on an industrial scale were used for the concrete trials. The concretes were investigated on the same principle as the mortars. Firstly, the reference concretes were made up in accordance with the Tables F2.1 and F2.2 specified in DIN 1045-2. For the concretes made with the test cements the aggregate grading curve was optimized, the water/cement ratio was lowered while retaining the paste content and a constant flow table spread (consistency F4) was obtained by using a PCE-based superplasticizer. The concrete compositions are summarized in Table 2.

2.4 Concrete compressive strength

The concrete compressive strength was determined in accordance with DIN EN 12390-3 after 7 and 28 days on cubes with edge lengths of 150 mm. The results are shown in Fig. 3. Concretes made with CEM (50 mass % LL3-3) cement and water/cement ratios of $w/c = 0.45$ or 0.35 exhibited significantly lower strengths than the concretes made with CEM (50 mass % LL1) or CEM (50 mass % LL3-1) cements. The reason for this is the reproducibly higher air content of these concretes (cf. Fig. 4). This combination of superplasticizer and grade of limestone seems to have a tenden-

scheidender Bedeutung, die Korngrößenverteilung aller Hauptbestandteile im Zementwerk gezielt aufeinander abzustimmen.

2.3 Betonversuche

Für die Betonversuche wurden die großtechnisch hergestellten Werkszemente verwendet. Die Betone wurden nach dem gleichen Prinzip wie die Mörtel untersucht: Zunächst wurden Referenzbetone entsprechend Tabelle F2.1 bzw. F2.2 der DIN 1045-2 zusammengesetzt. Für die Betone mit den Prüfzementen wurde die Sieblinie der Gesteinskörnung optimiert, der Wasserzementwert unter Beibehaltung des Leimgehalts gesenkt und durch die Verwendung eines PCE-basierten Fließmittels ein konstantes Ausbreitmaß (Konsistenz F4) eingestellt. Einen Überblick der Betonzusammensetzungen gibt Tafel 2.

2.4 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 im Alter von 7 und 28 Tagen an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Bild 3. Betone mit CEM (50 M.-% LL3-3) und Wasserzementwerten $w/z = 0,45$ bzw. $w/z = 0,35$ zeigen deutlich niedrigere Festigkeiten als die vergleichbaren Betone mit CEM (50 M.-% LL1) bzw. CEM (50 M.-% LL3-1). Grund dafür ist der reproduzierbar höhere Luftgehalt dieser Betone (vgl. Bild 4). Diese Kombination aus Fließmittel und Kalksteinqualität scheint zur Luftporenbildung zu neigen. Ein solches Verhalten ist selten, wird aber gelegentlich im Labor beobachtet. Die Gründe sind bisher nicht bekannt.

2.5 Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden wurde mithilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest [1, 2]) an den Betonen B3 bis B5 ermittelt. Bild 5 zeigt, dass der Chloridmigrationskoeffizient von Betonen mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein gegenüber Betonen mit praxisüblichen Zementen gleichwertig sein kann. Der Wasserzementwert ist dazu auf $w/z = 0,35$ zu verringern. Der erhöhte Luftgehalt des Betons mit CEM (50 M.-% LL3-3) (vgl. Bild 4) führt zu deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten, die nicht mehr im Bereich der Referenzbetone liegen. Einschränkung ist anzumerken, dass die Leistungsfähigkeit der Referenzbetone bezüglich ihres Widerstands gegenüber eindringenden Chloriden für Betone, bei denen ein hoher Chlorideindringwider-

cy to form air voids. This type of behaviour is rare but has been observed occasionally in the laboratory. The reasons are not yet known.

2.5 Resistance to chloride penetration

The resistance to penetrating chlorides was determined by a rapid test method (migration test [1, 2]) on concretes B3 to B5. Fig. 5 shows that the chloride migration coefficients of concretes made with cements containing 50 mass % limestone can be the same as those of concretes made with the cements normally used in practice. For this the water/cement ratio has to be lowered to $w/c = 0.35$. The increased air content of the concrete made with CEM (50 mass % LL3-3) cement (cf. Fig. 4) leads to significantly higher chloride migration coefficients that no longer lie in the same range as the reference concretes. This should be qualified by noting that the performance of the reference concretes with respect to their resistance to penetrating chlorides is not optimal for concretes that need a high chloride penetration resistance. Cements containing granulated blastfurnace slag perform better in this situation.

2.6 Freeze-thaw resistance

The freeze-thaw resistance of the concretes was measured by the CIF method as described by CEN/TR 15177. The scaling and relative dynamic modulus of elasticity were determined for up to 56 freeze-thaw cycles. The results are plotted in Figs. 6 and 7 as average values of five test specimens. In each case the results obtained with the reference concretes B3 made with CEM I 42,5 N, CEM II/A-LL 32,5 R and CEM II/B-LL 32,5 R cements are also shown for comparison.

Internal damage of the microstructure can normally be expected with freeze-thaw attack without the action of de-icing agents if unsuitable starting materials or unsuitable concrete compositions are used [3]. This can be described by the relative dynamic modulus of elasticity. Fig. 6 shows that the freeze-thaw resistance of concretes made with cements containing 50 mass % limestone can be equal to that of concretes made with cements that are normally used in practice. For this the water/cement ratio has to be reduced to at least 0.45. Synthetic air voids can make a significant improvement to the freeze-thaw resistance. As described above, the superplasticizer used combined with the CEM (50 mass % LL3-3) cement led to the formation of air voids. The concretes made with CEM

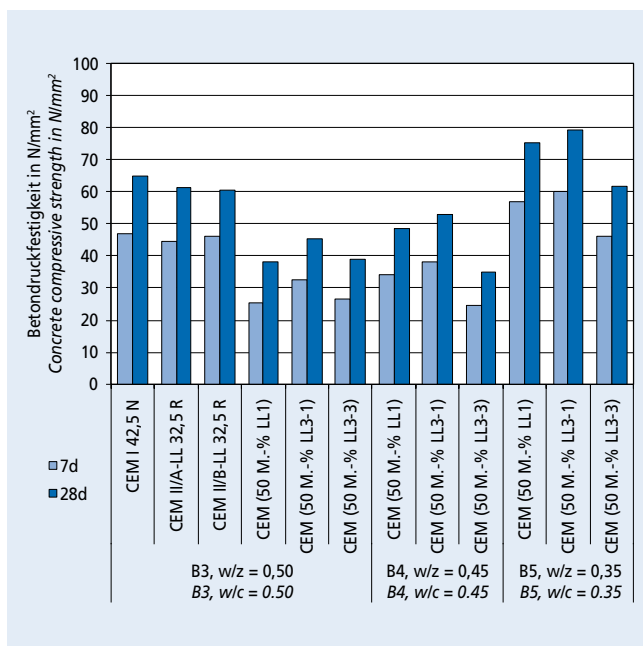


Bild 3: Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone B3 bis B5
Figure 3: Compressive strength development of the concretes B3 to B5 under investigation

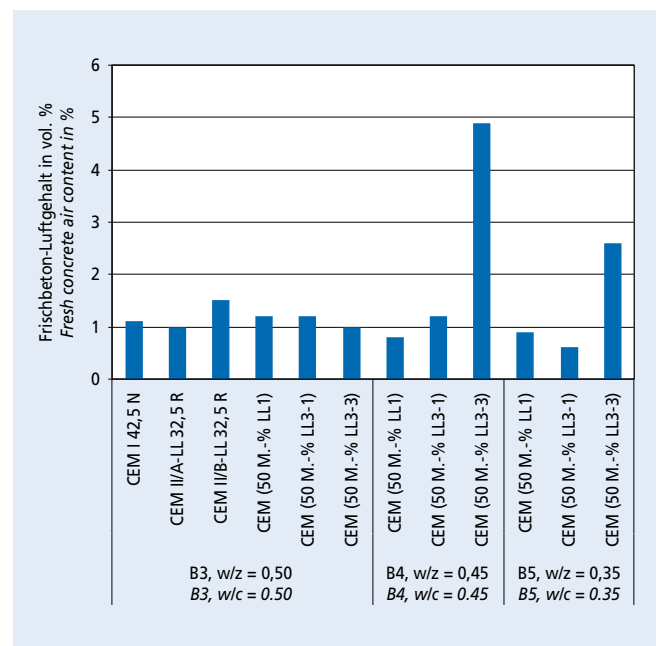


Bild 4: Frischbeton-Luftgehalte der untersuchten Betone B3 bis B5
Figure 4: Fresh concrete air content of the concretes B3 to B5 under investigation

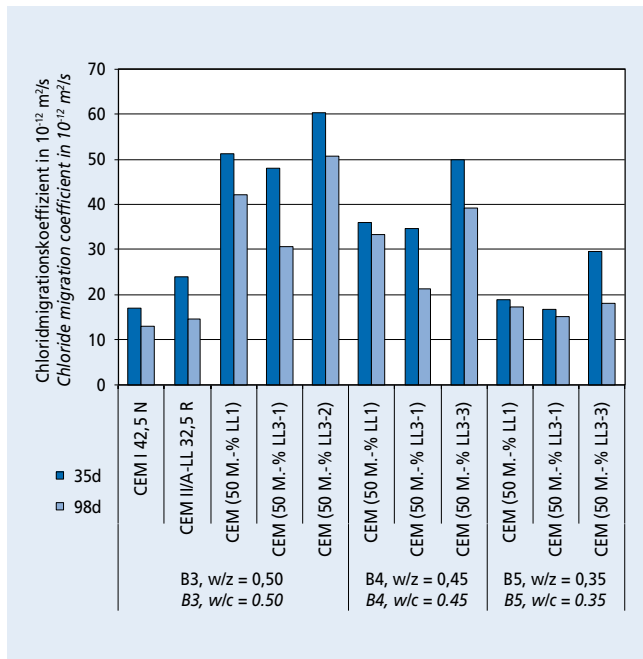


Bild 5: Chlorideindringwiderstand der Betone B3 bis B5
Figure 5: Chloride penetration resistance of concretes B3 to B5

stand notwendig ist, nicht optimal ist. Hüttensandhaltige Zemente sind hier leistungsfähiger.

2.6 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand von Betonen wurde mittels des CIF-Verfahrens gemäß CEN/TR 15177 bestimmt. Die Abwitterung und der relative dynamische E-Modul wurden bis zu 56 Frost-Tauwechseln bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 6 und Bild 7 als Mittelwerte von je fünf Prüfkörpern eingetragen. Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse mit den Referenzbetonen B3 mit CEM I 42,5 N, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R dargestellt.

Beim Frostangriff ohne Einwirkung von Taumitteln ist bei nicht geeigneten Ausgangsstoffen bzw. nicht geeigneter Betonzusam-

(50 mass % LL3-3) cement and superplasticizers (B4 and B5) do in fact show correspondingly low scaling and a slight drop in relative dynamic modulus of elasticity (Fig. 7) but are not directly comparable with the other concretes because of the air void content. The influence of the grade of limestone (which can be seen in Figs. 6 and 7 by comparing limestones LL1 and LL3) on the result of the freeze-thaw trials also requires further verification.

2.7 Carbonation

The carbonation tests were carried out on mortar prisms as described in DIN EN 196-1 (water storage until the seventh day). The depth of carbonation was measured after storage in a standard climate (20 °C and 65 % relative air humidity) at ages of up to 140 days. The water/cement ratios of cements containing high levels of limestone had to be reduced significantly to achieve the same depths of carbonation as the reference samples. Cements containing 50 and 60 mass % limestone with water/cement ratios of $w/c = 0.35$ and $w/c = 0.30$ respectively achieved the same depths of carbonation as fine concretes made with CEM I, CEM II/A-LL and CEM II/B-LL cements with $w/c = 0.50$ (cf. equivalence lines in Fig. 8).

2.8 Creep and shrinkage

Two cylinders with dimension of diameter = 158 mm and length = 300 mm were used in each test to measure the shrinkage by the method described in DAfStb Vol. 422, section 2.6 and the creep by the method described in section 2.7. The specimens were left in the mould for one day after the manufacturing, then stored under water until the seventh day and subsequently stored at a temperature of 20 °C and a relative air humidity of 65 ± 2 %. The shrinkage was measured from the seventh day. A creep stress of $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ was applied at the age of 28 days for the creep trials.

The results of the investigation of the shrinkage and creep are summarized in Figs. 9 and 10. Concretes B4 and B5 made with CEM (50 mass % LL1) cement with water/cement ratios $w/c = 0.45$ and 0.35 respectively exhibit behaviour comparable to the reference concrete B3 made with CEM II/A-LL cement and a water/cement ratio $w/c = 0.50$ in terms of both shrinkage and creep. However, the concretes made with cements containing limestone of provenance 3 exhibited both greater shrinkage and greater creep on all test dates. In addition to the durability it is therefore also necessary to consider the load-dependent

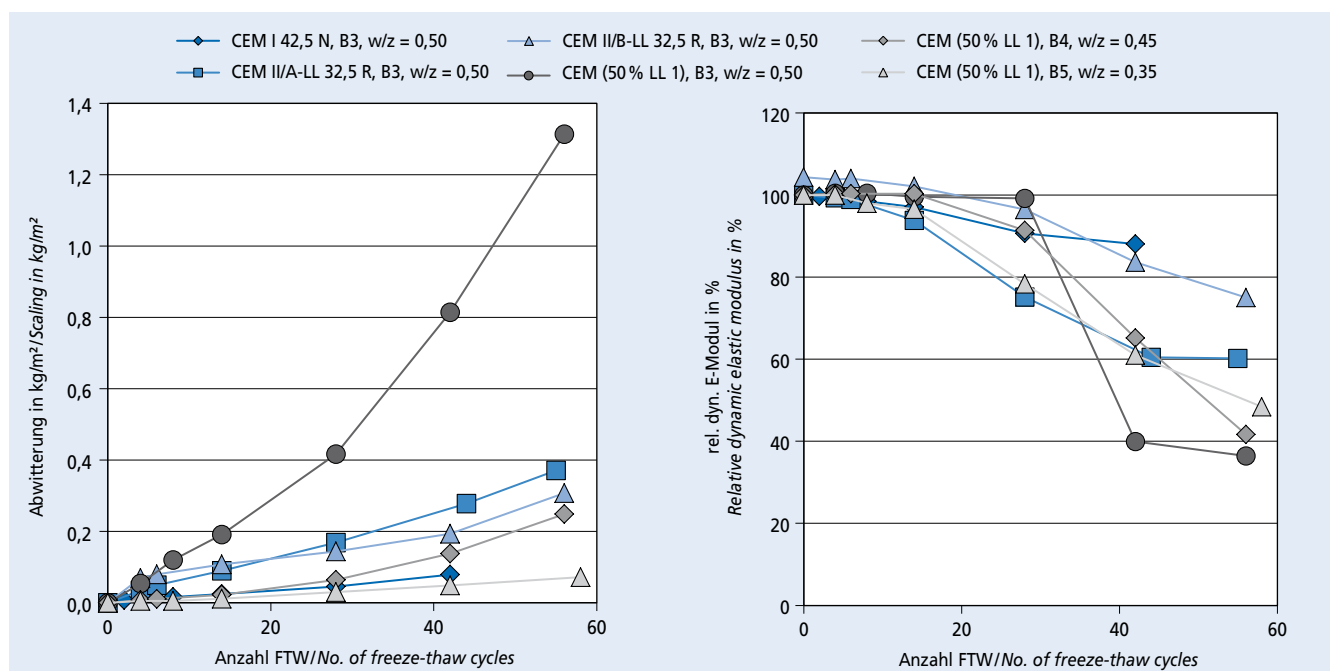


Bild 6: Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M. % LL1
Figure 6: Scaling and relative dynamic elastic modulus of concretes B3, B4 and B5 made with cements containing 50 mass % LL1

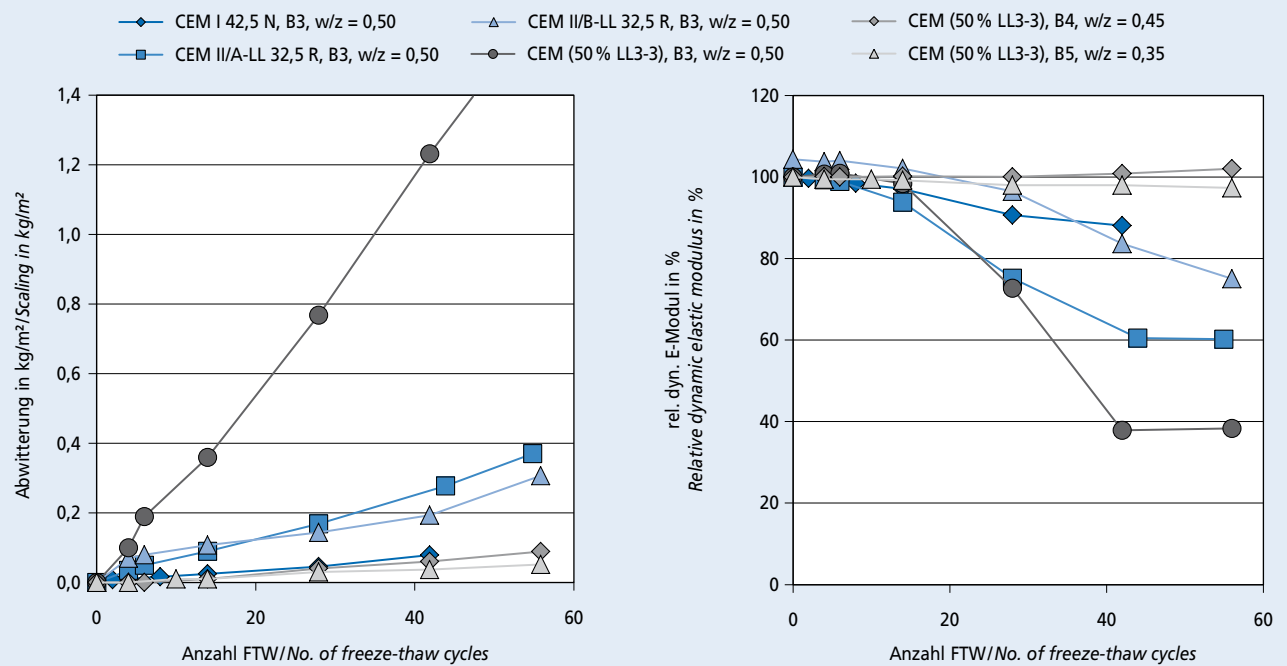


Bild 7: Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M. % LL3-3
Figure 7: Scaling and relative dynamic elastic modulus of concretes B3, B4 and B5 made with cements containing 50 mass % LL3-3

mensetzung i. d. R. hauptsächlich mit einer inneren Gefügeschädigung zu rechnen [3]. Diese kann durch den relativen dynamischen E-Modul beschrieben werden. Bild 6 zeigt, dass der Frostwiderstand von Betonen mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein gegenüber Betonen mit praxisüblichen Zementen gleichwertig sein kann. Der Wasserzementwert ist dazu mindestens auf 0,45 zu verringern. Künstliche Luftporen können den Frostwiderstand signifikant verbessern. Wie oben beschrieben, führte das eingesetzte Fließmittel in Kombination mit dem CEM (50 M.-% LL3-3) zur Bildung von Luftporen. Entsprechend zeigen die Betone mit

and load-independent deformation when using cements with high limestone contents.

3 Plant trials with ready-mixed concrete

Trials were carried out at the Niederkassel ready-mixed concrete plant of the Herkules Transportbeton GmbH & Co. KG in order to evaluate the suitability for practical construction work of the concretes investigated on a laboratory scale.

The CEM (50 mass % LL1) cement was produced on an industrial scale at the Spenner cement plant prior to the

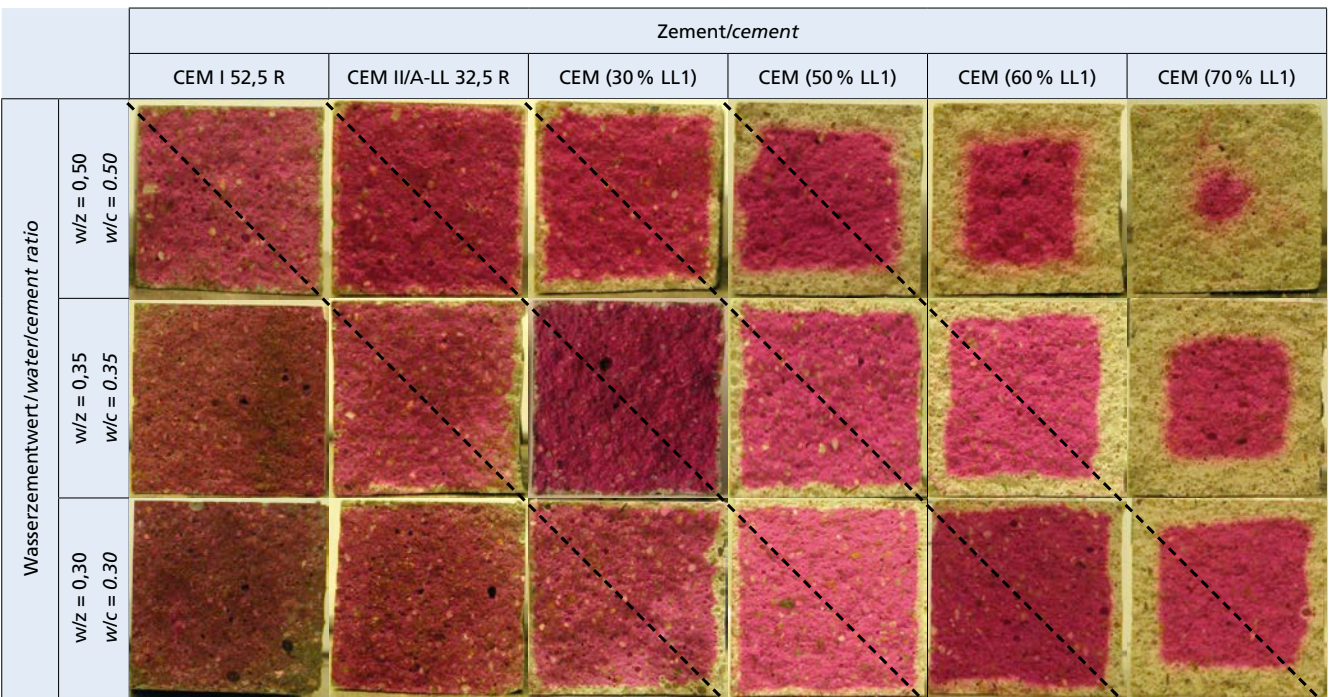


Bild 8: Carbonatisierung der Mörtelproben im Alter von 140 d
Figure 8: Carbonation of the mortar samples at 140 d
----- äquivalente Carbonatisierungstiefen

CEM (50 M.-% LL3-3) und Fließmitteleinsatz (B4 und B5) zwar eine geringe Abwitterung und einen geringen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (Bild 7), sind aber aufgrund der enthaltenen Luftporen nicht direkt mit den übrigen Betonen vergleichbar. Der Einfluss der Kalksteinqualität (zu sehen in den Bildern 6 und 7 im Vergleich der Kalksteine LL1 und LL3) auf das Ergebnis von Frostversuchen bedarf ebenfalls einer weiteren Absicherung.

2.7 Carbonatisierung

Die Carbonatisierungsprüfungen wurden an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 (Wasserlagerung bis zum siebten Tag) durchgeführt. Die Carbonatisierungstiefe wurde nach Lagerung im Normalklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) im Alter bis zu 140 Tagen bestimmt. Um eine zu den Referenzproben gleichwertige Carbonatisierungstiefe zu erzielen, ist der Wasserzementwert bei Zementen mit hohem Kalksteingehalt deutlich zu reduzieren. Bei Zementen mit 50 bzw. 60 M.-% Kalkstein ergeben sich bei Wasserzementwerten von $w/z = 0,35$ bzw. $w/z = 0,30$ Carbonatisierungstiefen wie bei Feinbetonen mit CEM I, CEM II/A-LL bzw. CEM II/B-LL und $w/z = 0,50$ (vgl. Äquivalenzlinien in Bild 8).

2.8 Kriechen und Schwinden

An je zwei Zylindern mit den Abmessungen $\varnothing = 158$ mm, $l = 300$ mm wurden in Anlehnung an DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.6, das Schwinden bzw. nach Abschnitt 2.7 das Kriechen gemessen. Die Probekörper wurden nach dem Betonieren einen Tag in der Schalung belassen, danach bis zum siebten Tag unter Wasser und anschließend bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von (65 ± 2) % gelagert. Das Schwinden wurde ab dem siebten Tag gemessen. Die Kriechspannung von $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ für die Kriechversuche wurde im Alter von 28 Tagen aufgebracht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Schwinden bzw. Kriechen sind in den Bildern 9 und 10 zusammengestellt. Die Betone B4 und B5 mit CEM (50 M.-% LL1) mit Wasserzementwert $w/z = 0,45$ bzw. $0,35$ zeigen sowohl beim Schwinden als auch beim Kriechen ein vergleichbares Verhalten wie der Referenzbeton B3 mit CEM II/A-LL und Wasserzementwert $w/z = 0,50$. Die Betone mit Zementen, die Kalkstein aus der Provenienz 3 enthalten, weisen jedoch sowohl ein höheres Schwinden als auch ein höheres

trials and stored in one of the cement silos at the Niederkassel site. Formwork for an unreinforced wall was set up in the grounds of the Niederkassel plant to observe the workability of the concrete under practical conditions and the long-term development of the hardened concrete properties. The formwork consisted of two parts at right-angles to one another, each with a length of 3.5 m, a height of 1.5 m and a width of 0.2 m.

Three concretes (M1, M2 and M3) were produced in batches of 2 m³ or 3 m³ (Table 3). A PCE-based superplasticizer was added to the concrete mixer (twin-shaft mixer) by an additive pump.

The moisture of the sand was measured continuously at the ready-mixed concrete plant with an ultrasonic probe so that it could be taken into account in the calculation of the amount of fresh water required. The moisture content of the coarser aggregate was assumed to be 1 mass % (M1). A very rainy day was involved so this value was corrected to 2 mass % (2/8 gravel) and 1.6 mass % (8/16) gravel for the M2 and M3 mix formulations. The air temperature during the trials was about 20 °C.

For the M1 mix the aggregate, cement, water and superplasticizer were added simultaneously to the twin-shaft mixer and mixed for two minutes. The concrete was transferred to a ready-mixed concrete vehicle where it was mixed for a few minutes and then tested. Because the assumed moisture content of the aggregate was too low the M1 mix formulation contained too much water and had a significant tendency to segregation (settling of the paste). Unreacted cement was also found in agglomerations with diameters of up to 7 cm. This was due to the excessively short mixing time and the simultaneous addition of all the components to the mixer. The M1 mix was therefore discarded.

The mixing regime for M2 was changed as follows: the assumed moisture content of the aggregate was adjusted and the paste content, and therefore the cement content, were slightly reduced. The cement and aggregate were prehomogenized briefly in the dry state and mixed for 1 min after addition of the water. The superplasticizer was then added and the mixing was continued for a further 2 min. During the determination of the fresh concrete properties the concrete exhibited significantly less tendency to segregation. The concrete was therefore used for filling the lower half of the test formwork. However, the concrete then exhibited significant segregation during placement in the formwork in that the coarse

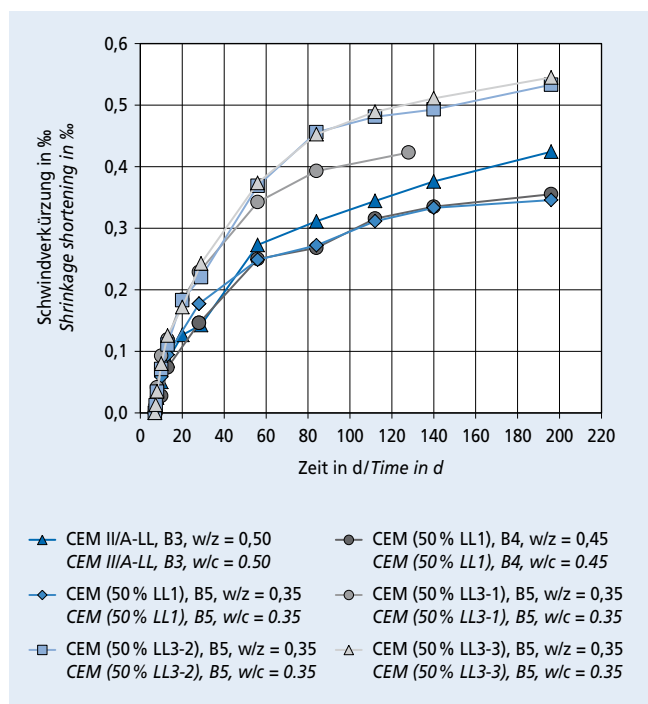


Bild 9: Verlauf der Schwindverformungen
Figure 9: Shrinkage deformation curves

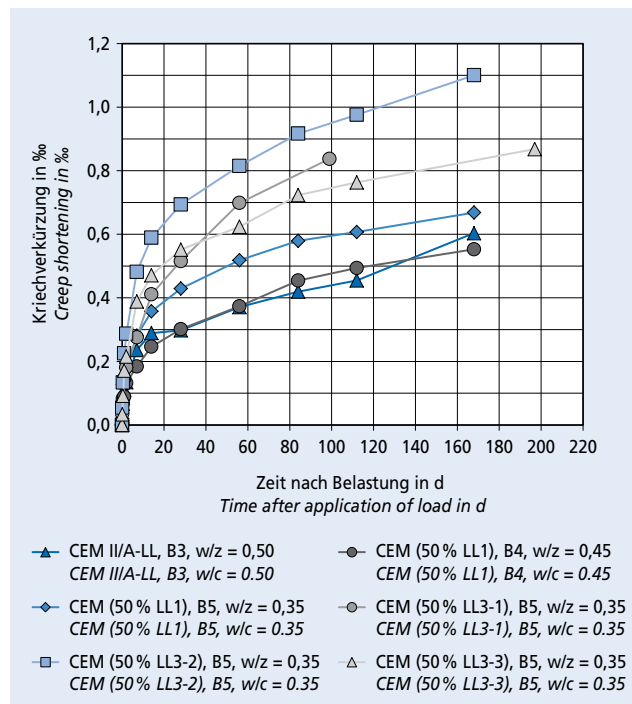


Bild 10: Verlauf der Kriechverformungen
Figure 10: Creep deformation curves

Tafel 3: Betonzusammensetzungen der Werksversuche
Table 3: Concrete compositions for the plant trials

	Einheit/ Unit	M1	M2	M3
Chargenvolumen Batch volume	m ³	2	2	3
CEM (50 M.-% LL1) CEM (50 mass % LL1) cement	kg/m ³	426	407	407
Sand 0...2 mm	kg/m ³	535	555	713
Kies 2...8 mm Gravel 2...8 mm	kg/m ³	475	500	487
Kies 8...16 mm Gravel 8...16 mm	kg/m ³	825	850	697
Wasser/Water ¹⁾	kg/m ³	145	138,5	138
Fließmittel Superplasticizer	kg/m ³	2,0	1,8	1,9
w/z-Wert w/c ratio	–	0,34	0,34	0,34

¹⁾ Zugabewasser + Gesteinskörnungsfeuchte

¹⁾ Mixing water + aggregate moisture

Kriechen zu allen Prüfzeitpunkten auf. Neben der Dauerhaftigkeit sind also auch die lastabhängigen und lastunabhängigen Verformungen bei der Verwendung von Zementen mit hohen Kalksteingehalten zu betrachten.

3 Werksversuch Transportbeton

Um die Eignung der im Labormaßstab untersuchten Betone für die Baupraxis zu bewerten, wurden Versuche im Transportbetonwerk Niederkassel der Firma Herkules Transportbeton GmbH & Co. KG durchgeführt.

Zur Vorbereitung der Versuche wurde der Zement CEM (50 M.-% LL1) im Zementwerk Spenner großtechnisch produziert und eines der Zementsilos am Standort Niederkassel damit befüllt. Auf dem Gelände des Werks Niederkassel wurde eine Schalung für eine unbewehrte Wand errichtet, um die Verarbeitbarkeit des Betons unter Praxisbedingungen sowie die Entwicklung seiner Festbetoneigenschaften langfristig beobachten zu können. Die Schalung bestand aus zwei zu einander im rechten Winkel stehenden Teilstücken mit einer Länge von jeweils 3,5 m, einer Höhe von 1,5 m und einer Breite von 0,2 m.

Es wurden drei Betone (M1, M2 und M3) in Chargen von 2 m³ bzw. 3 m³ hergestellt (Tafel 3). Ein PCE-basiertes Fließmittel wurde dem Betonmischer (Doppelwellenmischer) über eine Zusatzmittelpumpe zugegeben.

In dem Transportbetonwerk wird die Feuchte des Sands kontinuierlich mithilfe einer Ultraschallsonde gemessen, um sie in der Berechnung der benötigten Frischwassermenge berücksichtigen zu können. Die Feuchte der größeren Gesteinskörnung wurde zu 1 M.-% angenommen (M1). Da es sich um einen sehr regenerischen Tag handelte, wurde dieser Wert für die Rezepturen M2 und M3 auf 2 M.-% (Kies 2/8) bzw. 1,6 M.-% (Kies 8/16) korrigiert. Die Lufttemperatur während der Versuche betrug rd. 20 °C.

Für die Mischung M1 wurden Gesteinskörnung, Zement, Wasser und Fließmittel zeitgleich in den Doppelwellenmischer gegeben und zwei Minuten gemischt. Der Beton wurde in ein Transportbetonfahrzeug umgefüllt, dort einige Minuten gemischt und dann beprobt. Die Rezeptur M1 enthielt aufgrund der zu niedrig angenommenen Feuchte der Gesteinskörnung zu viel Wasser und neigte deutlich zum Entmischen (Absetzen des Leims). Zusätzlich wurde nicht aufgeschlossener Zement in Agglomeraten mit bis zu 7 cm Durchmesser gefunden. Ursächlich dafür waren die zu kurze Mischdauer sowie die zeitgleiche Zugabe aller Komponenten in den Mischer. Die M1 Mischung wurde daher verworfen.

aggregate settled. In order to avoid this effect the grading curve for M3 was adjusted to the particle size distribution normally used in the plant. There was a corresponding increase in the proportion of sand and a reduction in the proportion of 8/16 gravel (see Table 3). The upper half of the formwork was filled with this concrete. Neither during the testing of the fresh concrete properties nor during the concreting did the concrete exhibit any segregation.

Six cubes with edge lengths of 150 mm were produced from each of the M2 and M3 mixes for determining the compressive strength development. The compressive strengths of the two mixes determined from the test cubes were about 22 N/mm² after one day and about 53 N/mm² after 28 days, so they were significantly below the values determined in the laboratory trials (> 60 N/mm² after 28 days). The reason for this could have been the weather conditions on that day. It is possible that more moisture was introduced with the aggregate than had been assumed. A water/cement ratio that had been increased in this way would fit with the observed reduction in concrete compressive strengths. This means that particular attention must be paid to the production conditions when converting laboratory results to practical conditions for cements containing high levels of limestone. Greater safety margins (higher cement contents or water/cement ratios that were lowered further than theoretically necessary) would be a possible alternative.

The formwork was stripped from the concrete wall after five days. In the lower part of the wall that had been produced with the coarse-grained M2 concrete some gravel pockets were found in the base area that were attributed to the segregation observed during the concreting. On the other hand, the quality of the surface on the upper part of the wall, which had been made with the finer-grained M3 concrete, was good.

4 Evaluating the results with an ecobalance

The reference concretes and test concretes were compared in an ecobalance in order to assess whether the beneficial effects on the results of the ecobalance of the increased use of limestone in the cement are offset by the increased use of cement and superplasticizer in the concrete. The comparison was not carried out between the individual cements but between concretes with the same performance (strength and durability in the laboratory). The ecobalance was drawn up as described in DIN EN ISO 14040 and 14044. The basic data from the GaBi 5 software, the life cycle costs network (cement data project) and the EPD (Environmental Product Declaration) for the German average cement from the VDZ were used for the calculations. The transport distances from the plant to the user were ignored in the evaluation of the concretes. The global warming potential and the total energy consumption as primary energy (renewable and non-renewable), including energy from secondary fuels for concretes containing Portland cement and cements containing varying levels of limestone, are shown in Figs. 11 and 12.

In the comparison with the concretes made with the VDZ average cement and with CEM II/A-LL 32,5 R cement there was a reduction in the GWP by about 25 % with comparable concrete performance. When compared with the reference concrete made with CEM I cement there was a reduction in the GWP of about 35 %. Because of the significantly greater fineness required for the clinker component (which is hard to grind) in the CEM (50 mass % LL) cements there was no reduction in energy requirement compared with the reference concretes made with the VDZ average cement.

Das Mischregime für M2 wurde wie folgt verändert: Die angenommene Gesteinskörnungsfeuchte wurde angepasst und der Leim- und damit der Zementgehalt wurden leicht abgesenkt. Der Zement und die Gesteinskörnung wurden kurz trocken vorhomogenisiert, nach Wasserzugabe wurde 1 min gemischt, im Anschluss daran das Fließmittel zugegeben und weitere 2 min gemischt. Bei der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften neigte der Beton deutlich weniger zum Entmischen. Entsprechend wurde der Beton zur Füllung der unteren Hälfte der Probeschalung verwendet. Beim Einbau in die Schalung zeigte der Beton dann aber doch deutliche Entmischungserscheinungen, indem sich die grobe Gesteinskörnung absetzte. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde die Sieblinie für M3 an die im Werk übliche Korngrößenverteilung angepasst. Der Sandanteil wurde entsprechend erhöht und der Anteil Kies 8/16 gesenkt (s. Tafel 3). Mit diesem Beton wurde die obere Hälfte der Schalung gefüllt. Der Beton zeigte nunmehr weder während der Prüfung der Frischbetoneigenschaften noch während der Betonage Entmischungserscheinungen.

Von den Mischungen M2 und M3 wurden jeweils sechs Würfel mit einer Kantenlänge 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeitsentwicklung hergestellt. Die an den Probewürfeln ermittelten Druckfestigkeiten beider Mischungen lagen nach einem Tag bei ca. 22 N/mm², nach 28 Tagen bei etwa 53 N/mm² und damit deutlich unterhalb der in den Laborversuchen ermittelten Werte (> 60 N/mm² nach 28 Tagen). Grund dafür könnten beispielsweise die Wetterbedingungen an diesem Tag gewesen sein. Ggf. wurde über die Gesteinskörnung mehr Feuchte eingetragen als angenommen. Ein dadurch erhöhter Wasserzementwert würde zur beobachteten Absenkung der Betondruckfestigkeiten passen. Bei der Umsetzung von Laborergebnissen in die Praxis muss also bei Zementen mit hohen Kalksteingehalten ein besonderes Augenmerk auf die Herstellbedingungen gerichtet werden. Alternativ wären größere Vorhaltemaße (höhere Zementgehalte bzw. weiter als theoretisch nötig abgesenkte Wasserzementwerte) denkbar.

Die Betonwand wurde nach fünf Tagen ausgeschalt. Am unteren Teil der Wand, der mit dem grobkörnigen Beton M2 hergestellt wurde, waren im Fußbereich einige Kiesnester festzustellen, die auf die beim Betonieren beobachteten Entmischungserscheinungen zurückzuführen sind. Demgegenüber wies der obere Teil der Wand, der mit dem feinkörnigeren Beton M3 ausgeführt wurde, eine gute Oberflächenqualität auf.

4 Ökobilanzielle Bewertung der Ergebnisse

Um beurteilen zu können, ob die positiven Auswirkungen der erhöhten Verwendung von Kalkstein im Zement auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung durch den erhöhten Zement- und Fließmitteleinsatz im Beton ggf. kompensiert werden, wurden die Referenz- und Prüfbetone ökobilanziell verglichen. Der Vergleich erfolgt dabei nicht zwischen den einzelnen Zementen sondern zwischen Betonen gleicher Leistungsfähigkeit (Festigkeit und Dauerhaftigkeit im Labor). Die Ökobilanz wurde nach DIN EN ISO 14040 und 14044 erstellt. Für die Berechnungen wurde auf die Basisdaten der Software GaBi 5, des Netzwerks Lebenszykluskosten (Datenprojekt Zement) und die EPD für den deutschen Durchschnittszement des VDZ zurückgegriffen. Für die Bewertung der Betone wurden die Transportwege vom Werk zum Abnehmer vernachlässigt. In den Bildern 11 bzw. 12 sind das Treibhauspotenzial bzw. der Gesamtenergiebedarf als Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) zuzüglich Energie aus Sekundärbrennstoffen für Portlandzement und Zemente mit verschiedenen hohen Kalksteingehalten dargestellt.

Im Vergleich mit den Betonen aus VDZ-Durchschnittszement bzw. CEM II/A-LL 32,5 R ergibt sich eine Minderung des GWP von ca. 25 % bei vergleichbarer Betonleistungsfähigkeit. Gegenüber dem Referenzbeton mit CEM I wurde eine Verringerung des GWP um ca. 35 % erreicht. Aufgrund der benötigten deutlich höheren Mahlfineinheit der schwer mahlbaren Klinkerkomponente in den Zementen CEM (50 % LL) ergibt sich beim Energiebedarf keine Reduzierung gegenüber den Referenzbetonen aus VDZ-Durchschnittszement.

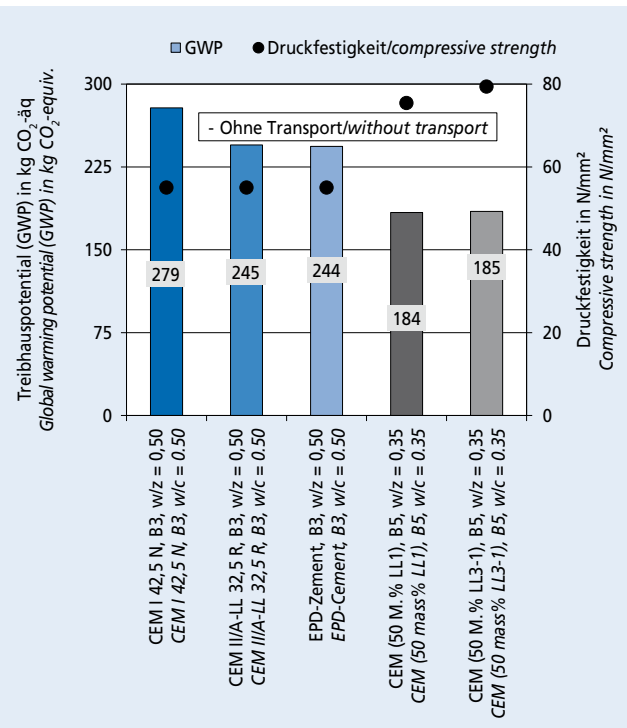


Bild 11: Treibhauspotenzial von Betonen mit einer Druckfestigkeit von mind. 50 N/mm² und vergleichbarer Dauerhaftigkeit in Laborprüfungen

Figure 11: Global warming potential of concretes with a compressive strength of at least 50 N/mm² and comparable durability in laboratory tests

Ohne Transport, Gesamtenergiebedarf (Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) zuzüglich Energie aus Sekundärbrennstoffen)
Without transport, total energy requirement (primary energy (renewable and non-renewable) including energy from secondary fuels)

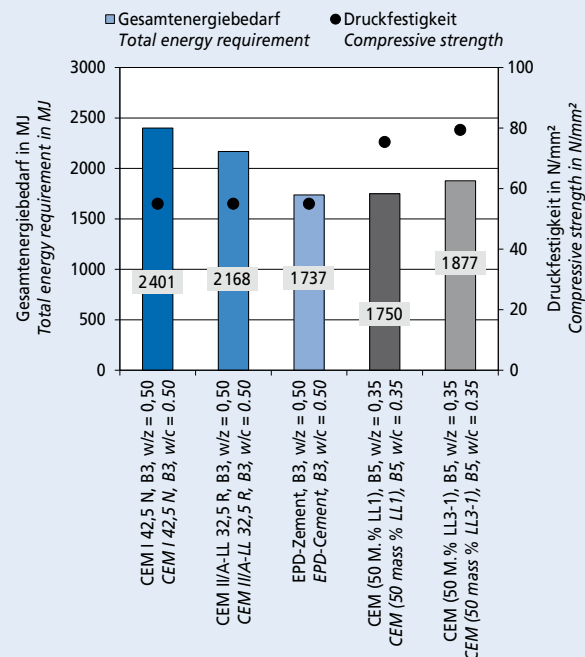


Bild 12: Gesamtenergiebedarf von Betonen mit einer Druckfestigkeit von mind. 50 N/mm² und vergleichbarer Dauerhaftigkeit in Laborprüfungen und vergleichbarer Dauerhaftigkeit in Laborprüfungen

Figure 12: Total energy requirement of concretes with a compressive strength of at least 50 N/mm² and comparable durability in laboratory tests

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Zemente mit bis zu 50 M.-% Kalkstein grundsätzlich zur Herstellung von Konstruktionsbetonen eignen würden, wenn die Betontechnologie angepasst wird. Der werkmäßige Betonversuch zeigte, dass der Beton bei sorgfältiger Einstellung des Wassergehaltes, der Fließmitteldosierung und der Sieblinie der Gesteinskörnung auf der Baustelle gut verarbeitet werden kann. Die Festigkeitsentwicklung blieb in diesem Fall hinter den Erwartungen zurück, was vermutlich auf die Wetterbedingungen am Versuchstag und den damit erhöhten Wasserzementwert zurückzuführen war. Bei der Umsetzung von Laborergebnissen in die Praxis muss also bei Zementen mit hohen Kalksteingehalten ein besonderes Augenmerk auf die Herstellbedingungen gerichtet werden.

Die Laborversuche mit dem Zement CEM (50 M.-% LL3-3) zeigen, dass nicht nur auf die Abstimmung der Zementhauptbestandteile untereinander sondern auch besonders auf die Abstimmung mit den Zusatzmitteln zu achten ist. Ein ungeplanter Eintrag von Luftporen über ein Fließmittel kann deutlich negative Auswirkungen auf die Entwicklung der Festigkeit sowie auf den Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden und die Carbonatisierung haben.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für die Herstellung und Verwendung kalksteinreicher Zemente bis 50 M.-% LL anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung erforderlich wären. Werden diese Maßnahmen unter Praxisbedingungen beherrscht, können zulassungsfähige Dauerhaftigkeitskennwerte am Beton erzielt werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf einer weiteren Absicherung. Auch dem Kriechen und Schwinden solcher Betone ist weitere Aufmerksamkeit zu widmen. Der Einfluss der Kalksteinqualität auf das Ergebnis von Frostversuchen bedarf ebenfalls einer weiteren Absicherung.

Weitere Ergebnisse zu den Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen (Schwankungen des Wasserzementwert bzw. der Frischbetontemperatur) sind im umfangreichen Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben enthalten. Dieser kann auf Anfrage von den Autoren zur Verfügung gestellt werden (z.B. sebastian.palm@vdz-online.de).

Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt e.V. gefördert, bei der wir uns an dieser Stelle herzlich bedanken möchten.

5 Summary

The results show that cements containing up to 50 mass % limestone are suitable, in principle, for producing structural concretes if the concrete technology is adapted. The concreting trial at the plant showed that a careful adjustment of the water content, the addition of superplasticizer and the aggregate grading curve can produce concrete with good workability on the construction site. In this particular case the strength development was below expectations, which was presumably due to the weather conditions on the day of the test and the requisite increase in water/cement ratio. This means that for cements containing high levels of limestone particular attention must be paid to the production conditions during practical implementation of laboratory results.

The laboratory trials with the CEM (50 mass % LL3-3) cement show that care must be taken regarding the interaction of the main cement constituents not only with one another but also, and in particular, with the admixtures. Unplanned introduction of air voids through a superplasticizer can have significantly negative effects on the strength development as well as on the resistance to chloride penetration and carbonation.

The situation can be summarized by stating that sophisticated process engineering measures in the cement plant and equally sophisticated concrete technology measures (low-water concrete with appropriate addition levels of admixtures) in the concrete production would be necessary for the production and use of high-limestone cements (up to 50 mass % limestone). If these measures can be implemented under practical conditions then it will be possible for the concrete to achieve durability parameters that can meet the approval requirements. The robustness of these systems in construction work requires further verification. More attention must be paid to the creep and shrinkage of such concretes and the influence of the limestone quality on the results of freeze-thaw tests also requires further verification.

Further results relating to the effects of various influencing factors (fluctuations in the water/cement ratio and in the fresh concrete temperature) are contained in the comprehensive final report on the research project. This can be made available on application to the authors (e.g. sebastian.palm@vdz-online.de).

Acknowledgement

The research project was funded by the Deutschen Bundesstiftung Umwelt e.V. (German Federal Environmental Foundation), which we would like to thank at this point.

Literatur / Literature

- [1] Chlorideindringwiderstand von Beton. BAW-Merkblatt Chlorideindringwiderstand, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2004
- [2] Tang L.: Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg 1996
- [3] Setzer, M. J.: Frostscha den: Grundlagen und Prüfung. Beton und Stahlbetonbau 97 (2002) H. 7, S. 350–359

Christoph Müller, Sebastian Palm, Düsseldorf, Albrecht Wolter, Thomas Bohne, Clausthal

Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton

Characteristic values based on degree of hydration for predicting the durability of concrete

Übersicht

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens war die Zunahme von bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen für Zemente, die in Deutschland nach DIN 1045-2 nicht prinzipiell für alle Expositionsklassen zugelassen sind. Im Rahmen des Zulassungsverfahrens sind verschiedene Dauerhaftigkeitsprüfungen durchzuführen, die zum Beispiel in [1] beschrieben sind. Die entsprechenden Prüfverfahren sind jedoch zeit- und kostenintensiv.

Die VDZ gGmbH und die Technische Universität Clausthal haben deshalb in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben Hydratationsgrad basierte Kennwerte ermittelt, die Rückschlüsse auf Dauerhaftigkeitskriterien zulassen. Das Verfahren zur Beurteilung von Zementen, die eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erfordern, könnte damit unterstützt und ggf. beschleunigt werden. Vor der eigentlichen Dauerhaftigkeitsprüfung, die durch die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens nicht ersetzt, sondern nur ergänzt werden soll, kann festgestellt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, eine solche Prüfung zu bestehen. Da in den Zulassungsprüfplänen die Betonrezepturen genau definiert sind, zielen die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Kennwerte nicht auf beliebig zusammengesetzte Betone, sondern auf beliebig zusammengesetzte Zemente in definierten Betonrezepturen ab.

Es konnte gezeigt werden, dass die Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Zemente in den meisten Fällen nur schwache bzw. keine Orientierungswerte für die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen liefert. Auf Basis des Hydratationsgrads von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln konnten Kennwerte ermittelt werden, die geeignet erscheinen, eine Bewertung hinsichtlich des jeweiligen Abnahmekriteriums der Dauerhaftigkeitsprüfungen zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Kennwerte sind keine Versuche am Festbeton notwendig. Die Dauerhaftigkeit der zulassungskonform zusammengesetzten Betone lässt sich anhand von Zementstein- und Mörtel Eigenschaften abschätzen.

1 Einleitung

Das wesentliche Merkmal des Baustoffes Beton ist, bei sachge rechter Zusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung, neben der Festigkeit seine Dauerhaftigkeit. Sollen Zemente verwendet werden, mit denen keine baupraktischen Erfahrungen vorliegen, ist vor ihrem Einsatz zu prüfen, ob bei ihrer Anwendung dauerhafter Beton hergestellt werden kann. Hierzu ist in Deutschland eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erforderlich. Die durchzuführenden Prüfungen sind in entsprechenden Prüfplänen festgelegt und beurteilen die Eignung der entsprechenden Zemente anhand vorgegebener Kriterien.

Die VDZ gGmbH und die Technische Universität Clausthal haben in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben untersucht, ob es möglich ist, Hydratationsgrad basierte Kennwerte zu ermitteln, die Rückschlüsse auf Dauerhaftigkeitskriterien zulassen. Vor der eigentlichen Dauerhaftigkeitsprüfung im Rahmen des Zulassungs-

Abstract

The initial position for the research project was the increase in general technical approvals for cements that according to DIN 1045-2 are not approved in principle in Germany for all exposure classes. Various durability tests that are described in, for example [1], have to be carried out as part of the approval procedure. However, the corresponding test procedures are time-consuming and cost intensive.

In a joint research project VDZ gGmbH and Clausthal Technical University have therefore identified some characteristic values based on degree of hydration that allow conclusions to be drawn about durability criteria. This could support and possibly accelerate the procedure for assessing cements that require general technical approval. Before the actual durability testing, which is not to be replaced but only amplified by the results of this research project, it is possible to test whether a cement is suitable to pass such a test. The concrete mix formulations are precisely defined in the approval test plans so the characteristic values developed in this research project are not aimed at concretes with arbitrary compositions but at cements with arbitrary compositions in defined concrete mix formulations.

It has been possible to show that in most cases the concrete or mortar compressive strengths of the cements investigated in this research project provided only weak guide values or none at all for the results of the durability investigations. On the basis of the degree of hydration of the hardened cement paste and the porosity of standard mortars it was possible to identify characteristic values that seem suitable for carrying out an assessment with respect to the particular acceptance criteria of the durability tests. No tests on hardened concrete are needed for determining the characteristic values. The durability of concretes with compositions that conform to the approval test plans can be estimated with the aid of the properties of the hardened cement paste and mortar.

1 Introduction

If a concrete has the correct composition and has been properly produced and cured its essential characteristics as a construction material are not only its strength but also its durability. If cements are to be used for which there is no practical construction experience then it is necessary to check whether durable concrete can be produced with them. In Germany this requires general technical approval from the DIBt (German Institute for Building Technology). The tests that have to be carried out are laid down in corresponding test plans and assess the suitability of the corresponding cements on the basis of predetermined criteria.

In a joint research project the VDZ gGmbH (German Cement Works Association) and Clausthal Technical University have investigated whether it is possible to determine characteristic values based on the degree of hydration that permit conclusions to be drawn about durability criteria. Before the actual durability testing during the approval procedure it could be possible to test whether

Tafel 1: Betonrezepturen und Prüfungen
Table 1: Concrete mix formulations and tests

Beton Concrete	Zementgehalt Cement content	w/z w/c	Luftgehalt im Frischbeton ¹⁾ Air content in the fresh concrete ¹⁾	Festbetonprüfungen Hardened concrete tests
FB ²⁾	450 g/Mischung 450 g/mixture	0,50	keine Vorgabe no specification	Druckfestigkeit, Carbonatisierung compressive strength, carbonation
B2	300 kg/m ³	0,60	keine Vorgabe no specification	Druckfestigkeit, Würfelfrost compressive strength, freeze-thaw cube test
B3	320 kg/m ³	0,50	keine Vorgabe no specification	Druckfestigkeit, ClF, Chlorideindringwiderstand compressive strength, ClF, chloride migration resistance
B4	320 kg/m ³	0,50	(4,5 ± 0,5) %	Druckfestigkeit, CDF compressive strength, CDF

¹⁾ gemäß DIN EN 12350-7/in accordance with DIN EN 12350-7

²⁾ Feinbetonrezeptur mit 1350g Sand und Kies der Sieblinie A8/B8

Fine concrete mix formulation with 1350 g sand and gravel with the A8/B8 grading curve

verfahrens könnte festgestellt werden, ob ein Zement geeignet erscheint, eine solche Prüfung zu bestehen. Da in den Zulassungsprüfungen in Deutschland die Betonrezepturen genau definiert sind, zielen die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Kennwerte nicht auf beliebig zusammengesetzte Betone, sondern auf beliebig zusammengesetzte Zemente in definierten Betonrezepturen ab. Diese sind in Tafel 1 zusammengestellt.

2 Ausgangsstoffe und Methoden

Es wurden zwei Portlandzemente und fünf weitere Zementhauptbestandteile (zwei Hüttensande, zwei Steinkohlenflugaschen und ein Kalkstein) in unterschiedlicher Feinheit ausgewählt (Bild 1). Aus diesen Komponenten wurden 28 Laborzemente innerhalb und außerhalb der Grenzen der derzeitigen DIN EN 197-1 hergestellt. Der nebenbestandteils- und sulfatfrei gerechnete Klinkeranteil lag zwischen 50 und 100 M.-%. Weitere Hauptbestandteile wurden jeweils zwischen 0 und 35 M.-% eingesetzt. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden Zemente aus Zulassungsverfahren – nach Freigabe durch den Antragsteller – anonymisiert in das Projekt mit einbezogen. Aus diesen Zementen wurde Betone gemäß den Vorgaben der DIBt-Zulassungsverfahren (s. Tafel 1) hergestellt und deren Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit geprüft.

Der Frostwiderstand wurde mit dem Würfelverfahren gemäß DIN EN 12390-9 und dem CIF-Verfahren gemäß CEN/TR 15177 geprüft. Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde mit dem CDF-Verfahren gemäß DIN EN 12390-9 ermittelt. Der Chlorideindringwiderstand (Migrationskoeffizient) wurde mit dem Schnelltest gemäß des BAW-Merkblatts [2] geprüft. Der Widerstand gegen Carbonatisierung wurde an Feinbetonen mit w/z = 0,50 mit einer Sieblinie A8/B8 nach 7 und 28 Tagen Vorlagerung gemäß [1] bestimmt.

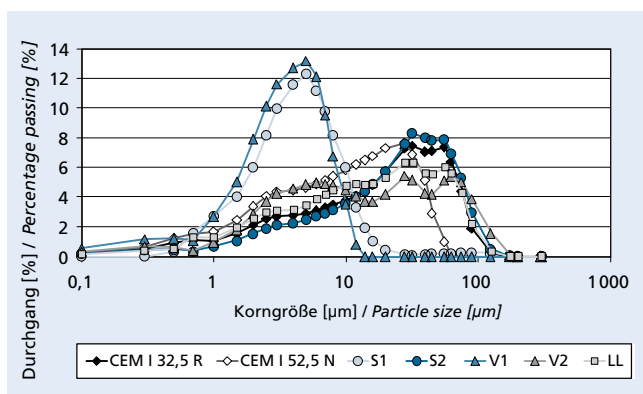


Bild 1: Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe
Figure 1: Particle size distributions of the starting materials

a cement seems suitable for passing such a approval procedure. The concrete mix formulations are precisely defined in the approval tests in Germany so the characteristic values developed in this research project are aimed not at concretes with arbitrary compositions but at cements with arbitrary compositions in defined concrete mix formulations. These are listed in Table 1.

2 Constituents and methods

Two Portland cements and five other main cement constituents (two granulated blastfurnace slags, two fly ashes from bituminous coal and a limestone) with differing finenesses were selected (Fig. 1). 28 laboratory cements, within and outside the limits of the current DIN EN 197-1, were produced from these components. The proportion of clinker, calculated without the secondary constituents and sulfate agent, lay between 50 and 100 mass %. Other main constituents were each used in proportions between 0 and 35 mass %. Cements from approval procedures – after clearance from the submitter – were also included anonymously in the project to extend the data base. Concretes were produced from these cements in accordance with the guidelines from the DIBt approval process (see Table 1) and tested for compressive strength and durability.

The freeze-thaw resistance was tested by the cube method specified in DIN EN 12390-9 and by the CIF method specified by CEN/TR 15177. The resistance to freeze-thaw with de-icing salt was determined by the CDF method specified in DIN EN 12390-9. The chloride penetration resistance (migration coefficient) was tested by the rapid test specified in the code of practice [2] issued by the BAW (Federal Waterways Engineering and Research Institute). The resistance to carbonation was determined on fine concretes with w/c = 0.50 and the A8/B8 grading curve after preliminary storage for 7 or 28 days as described in [1].

3 Evaluation and characteristic values

3.1 General

Not only the progress of hydration but also the pore system that is formed are of crucial importance for the durability of a concrete. During freeze-thaw stressing the air void system also has an influence on the scaling and the damage to the internal microstructure. Appropriate parameters were therefore evaluated for deriving characteristic values for predicting the durability. The degree of hydration (HG) of the hardened cement paste was determined at different test ages. Cement paste samples, in which the hydration was stopped after 2 days, 7 days or 28 days by grinding in acetone, washing with diethyl ether and then vacuum drying, were produced for this purpose. The hardened cement paste samples were then heated to a temperature of 1250 °C for simultaneous thermal analysis and the loss in mass attributable to water was evaluated with a mass spectrometer in the exhaust gas stream.

3 Auswertung und Kennwerte

3.1 Allgemeines

Für die Dauerhaftigkeit eines Betons sind zum einen der Hydratationsfortschritt und zum anderen das sich ausbildende Porensystem von entscheidender Bedeutung. Bei Frostbeanspruchungen hat zusätzlich das Luftporensystem einen Einfluss auf die Abwitterung bzw. die innere Gefügeschädigung. Entsprechende Parameter wurden daher zur Ableitung von Kennwerten zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit ausgewertet. Der Hydratationsgrad (HG) wurde zu verschiedenen Prüfzeitpunkten am Zementstein bestimmt. Hierfür wurden Zementleimproben hergestellt, deren Hydratation nach 2 Tagen, 7 Tagen und 28 Tagen durch Mörsern in Aceton, Waschen mit Diethylether und anschließender Vakuumtrocknung gestoppt wurde. Die Zementsteinproben wurden im Anschluss in der Simultan-Thermo-Analyse bis zu einer Temperatur von 1250 °C aufgeheizt und der auf Wasser zurückzuführende Masseverlust mittels eines Massenspektrometers im Abgasstrom ausgewertet.

Gemäß Locher [3] wurde aus diesem Masseverlust Δm mithilfe der Gleichung $HG = \frac{\Delta m}{0,23}$ der Hydratationsgrad (HG) der Proben berechnet. Die Porenradialverteilung wurde gemäß DIN 66133 am Normmörtel im Alter von 28 Tagen untersucht. Die Porenradialverteilung wurde zum einen hinsichtlich diskreter Werte (Bild 2) ausgewertet. Zum anderen wurde die Porenradialverteilung, wie in Bild 3 dargestellt, mittels zweier Geraden interpoliert. Ausgewertet wurden die Steigungen der beiden Geraden S1 und S2 sowie der Schnittpunkt der Geraden (Grenzzadius r_G).

Der Luftgehalt (L) wurde an Frisch- und Festbeton bestimmt, kann aber in erster Näherung auch anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt werden. Diese Parameter sowie Parameterkombinationen wurden mit den Ergebnissen der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zum jeweiligen Bewertungszeitpunkt korreliert. In den folgenden Diagrammen ist die jeweils beste Korrelation, bezogen auf den Korrelationskoeffizient R^2 , angegeben.

3.2 Chloridmigrationswiderstand

In Bild 4 bzw. Bild 5 sind die Korrelationen zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B3 nach 35 Tagen und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert (K_{Cl}) dargestellt.

In Deutschland gilt für Zulassungen ein Grenzwert von $D_{Cl} = 25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ [1]. Im Bereich des Wasserbaus ist für die Expositionsklassen XD1, XD2, XS1 und XS2 ein Wert von $D_{Cl} = 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ gemäß BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“ [2] maßgebend.

Bild 4 zeigt, dass zwischen der Betondruckfestigkeit und dem Chlorideindringwiderstand ein prinzipieller Zusammenhang besteht. Insbesondere bezüglich der genannten Grenzwerte können

The degree of hydration (HG) of the samples was calculated from this mass loss Δm using the equation $HG = \frac{\Delta m}{0,23}$ as described by Locher [3]. The pore size distribution was investigated in the standard mortar at 28 days as specified in DIN 66133. The pore size distribution was evaluated not only with respect to discrete values (Fig. 2) but also by interpolation using two straight lines (Fig. 3). The slopes of the two straight lines S1 and S2 were evaluated as well as the point of intersection of the straight lines (limit radius r_G).

The air content (L) was determined in fresh and hardened concrete but can also be estimated to a first approximation using empirical values. These parameters and parameter combinations were correlated with the results of the durability investigations at the respective times of evaluation. The following diagrams show the best correlation, in terms of the correlation coefficient R^2 , for each case.

3.2 Resistance to chloride migration

The correlations between the chloride migration coefficients of the B3 concrete after 35 days and the concrete compressive strength and a characteristic value (K_{Cl}) are shown in Fig. 4 and Fig. 5 respectively.

A limit of $D_{Cl} = 25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ applies for technical approvals in Germany [1]. In the hydraulic engineering sector a value of $D_{Cl} = 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ applies for exposure classes XD1, XD2, XS1 and XS2 in accordance with the BAW code of practice “Chloride penetration resistance” [2].

Fig. 4 shows that in principle there is a relationship between concrete compressive strength and chloride penetration resistance. However, no reliable information concerning the above-mentioned limits can be obtained from this relationship.

The relationship between the characteristic value $K_{Cl} = \frac{HG_{28d}}{P_{0,02}}$ and the chloride penetration resistance is shown in Fig. 5. The correlation coefficient of $R^2 = 0.71$ is significantly larger. For a cement that requires building inspectorate application approval and has a characteristic value of at least $K_{Cl} > 7$ it can be assumed that the chloride penetration resistance test will be passed. For the hydraulic engineering sector the characteristic value would have to be $K_{Cl} > 12$.

3.3 Freeze-thaw resistance (cube method)

The correlations between freeze-thaw resistance (cube method) of the B2 concrete and the concrete compressive strength and a characteristic value $K_{WF} = -1 \times HG_{28d} \times L \times \frac{S_2^2}{r_G^2}$ are shown in Fig. 6 and Fig. 7 respectively.

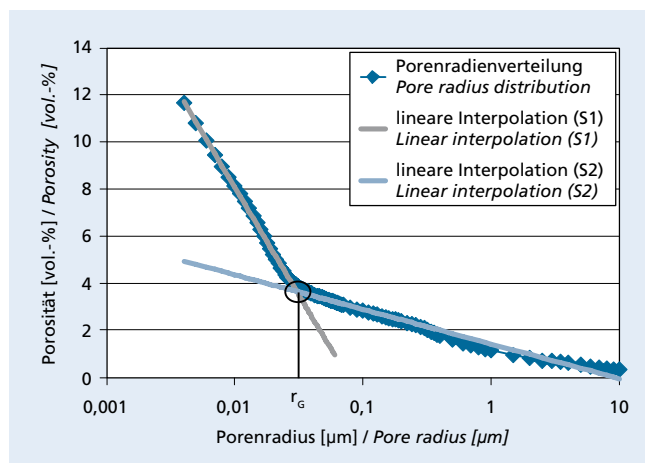


Bild 2: Auswertung der Porenradialverteilung mittels diskreter Werte
Figure 2: Evaluation of the pore radius distribution using discrete values

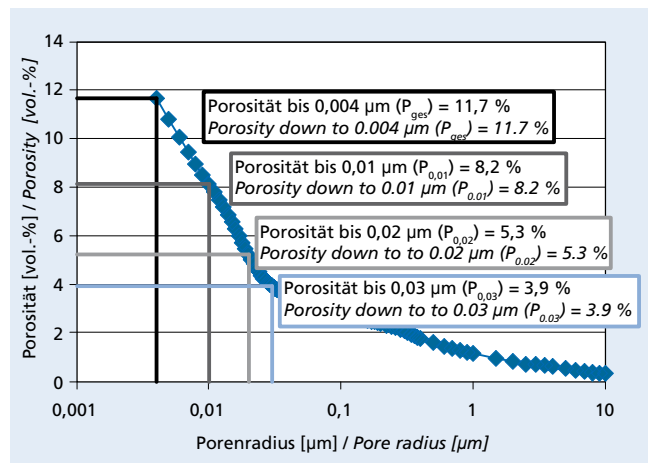


Bild 3: Auswertung der Porenradialverteilung mittels linearer Interpolation
Figure 3: Evaluation of the pore radius distribution by linear interpolation

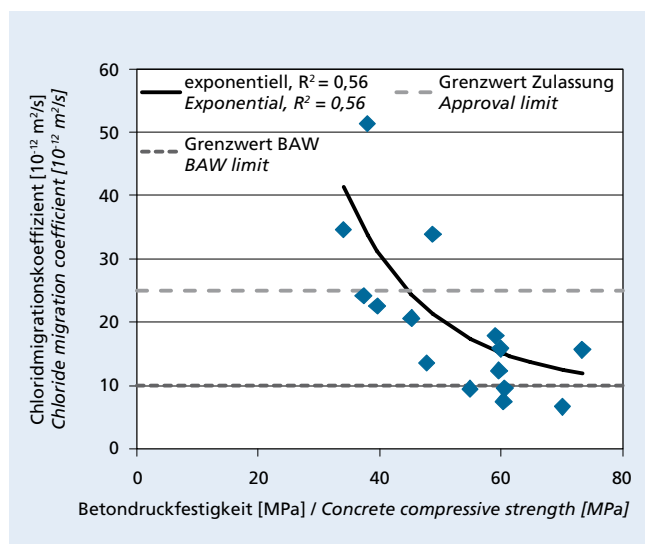


Bild 4: Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und der Betondruckfestigkeit

Figure 4: Correlation between the chloride migration coefficients and the concrete compressive strength

auf Grundlage dieses Zusammenhangs jedoch keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden.

In Bild 5 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert $K_{CI} = \frac{HG_{7d}}{P_{0,02}}$ und dem Chlorideindringwiderstand dargestellt. Der Korrelationskoeffizient ist mit $R^2 = 0,71$ deutlich größer. Bei einem Zement, für den eine bauaufsichtliche Anwendungszulassung erforderlich ist und der mindestens einen Kennwert von $K_{CI} > 7$ aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Chlorideindringwiderstands bestanden wird. Für den Bereich des Wasserbaus müsste der Kennwert $K_{CI} > 12$ sein.

3.3 Frostwiderstand (Würfelverfahren)

In Bild 6 bzw. Bild 7 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) der Betone B2 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert $K_{WF} = -1 \times HG_{2d} \times L \times \frac{S^2}{T_G}$ dargestellt.

Eine Abwitterung von maximal 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) gilt in Deutschland als Grenzwert in Zulas-

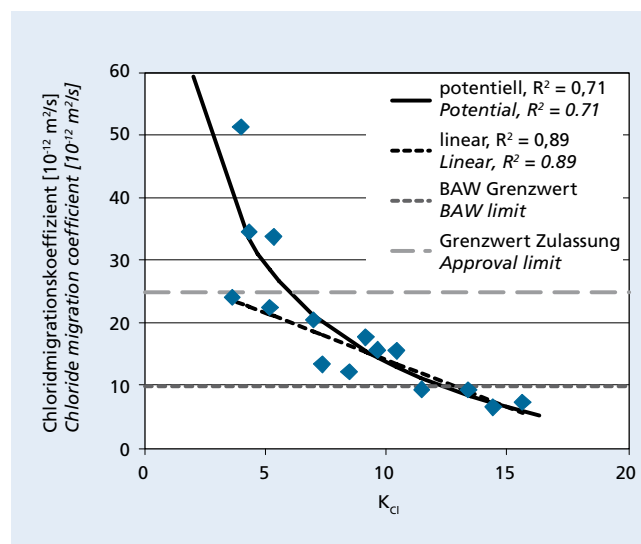


Bild 5: Korrelation zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten und dem Kennwert K_{CI}

Figure 5: Correlation between the chloride migration coefficients and the characteristic value K_{CI}

A maximum scaling of 10 mass % after 100 freeze-thaw cycles is the limit in the approval procedure in Germany [1]. Fig. 6 shows a relationship in principle between the concrete compressive strength and the scaling. Above a strength of ≥ 40 MPa it can be assumed that the freeze-thaw resistance test by the cube method will be passed. However, the relationship shows a certain lack of clarity in the range between 30 and 40 MPa.

The correlation coefficient between the characteristic value K_{WF} and the scaling by the cube method is $R^2 = 0.9$. For a cement that requires building inspectorate application approval and has a characteristic value of at least $K_{WF} > 500$ it can be assumed that the test of freeze-thaw resistance by the cube method will be passed.

3.4 Freeze-thaw resistance (CIF method)

The correlations between the freeze-thaw resistance by the CIF method of the B3 concrete and the concrete compressive strength and a characteristic value $K_{CIF,E}$ (for the relative dynamic modulus of elasticity) are shown in Fig. 8 and Fig. 9 respectively.

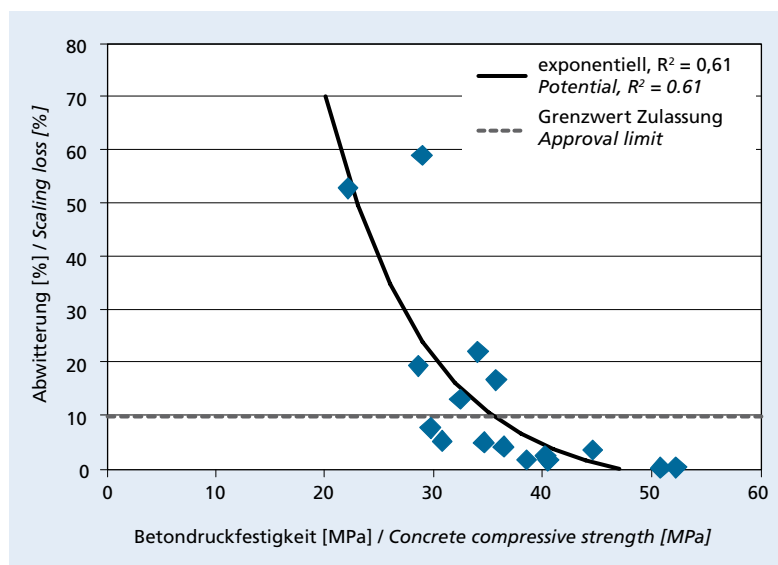


Bild 6: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und der Betondruckfestigkeit

Figure 6: Correlation between freeze-thaw resistance (cube test) and concrete compressive strength

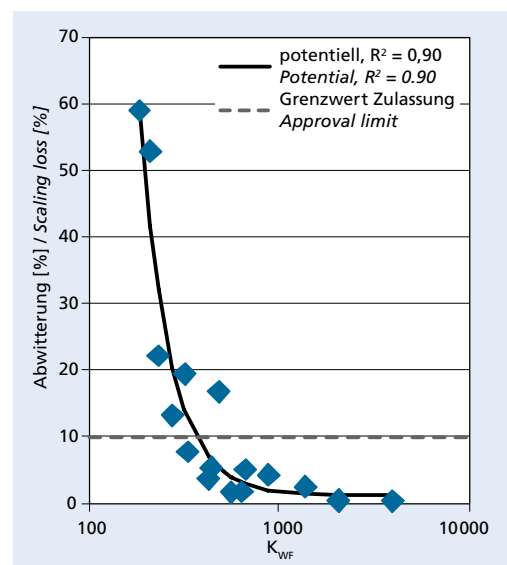


Bild 7: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Würfelverfahren) und dem Kennwert K_{WF}

Figure 7: Correlation between freeze-thaw resistance (cube test) and the characteristic value K_{WF}

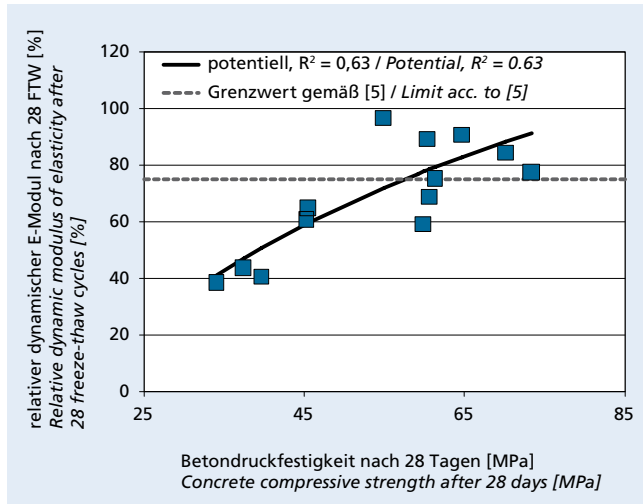


Bild 8: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und der Betondruckfestigkeit
Figure 8: Correlation between the freeze-thaw resistance (relative dynamic elastic modulus, CIF) and concrete compressive strength

sungsverfahren [1]. Bild 6 zeigt einen prinzipiellen Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Abwitterung. Ab einer Festigkeit von ≥ 40 MPa kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Frostwiderstandes mit dem Würfelverfahren bestanden wird. Im Bereich zwischen 30 und 40 MPa weist der Zusammenhang jedoch eine gewisse Unschärfe auf.

Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Kennwert K_{WF} und der Abwitterung im Würfelverfahren beträgt $R^2 = 0,9$. Bei einem Zement, für den eine bauaufsichtliche Anwendungszulassung erforderlich ist und der mindestens einen Kennwert von $K_{WF} > 500$ aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass die Prüfung des Frostwiderstandes mit dem Würfelverfahren bestanden wird.

3.4 Frostwiderstand (CIF-Verfahren)

In Bild 8 und Bild 9 sind die Korrelationen zwischen dem Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren der Betone B3 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert ($K_{CIF,E}$ für den relativen dynamischen E-Modul) dargestellt.

Bei einem Frostangriff im CIF-Verfahren ist bei nicht sachgerecht zusammengesetztem Beton nach [4] im Wesentlichen mit einer inneren Gefügeschädigung zu rechnen. Entsprechend gilt in Deutschland in einigen Anwendungsbereichen als wesentliches Abnahmekriterium ein relativer dynamischer E-Modul von mind. 75 % nach 28 FTW [1, 5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt eine maximale Abwitterung von $1,0 \text{ kg/m}^2$.

In Bild 8 wird deutlich, dass die Betondruckfestigkeit nicht ausreicht, das Abnahmekriterium „relativer dynamischer E-Modul“ sicher vorherzusagen. Insbesondere Betone mit einer Betondruckfestigkeit von rd. 50 bis 60 MPa können deutliche Unterschiede im relativen dynamischen E-Modul nach 28 FTW aufweisen. Die Werte lagen hier zwischen 97 % und 59 % und schwanken damit um das Abnahmekriterium.

In Bild 9 ist der Zusammenhang zwischen dem Kennwert $K_{CIF,E} = \frac{HG_{28d}}{P_{0,02}}$ und dem relativen dynamischen E-Modul dargestellt. Dieser Zusammenhang verläuft linear. Ab einem Kennwert von rd. 14 halten die im Forschungsvorhaben eingesetzten Zemente bzw. Betone das Abnahmekriterium sicher ein.

3.5 Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Verfahren)

In Bild 10 und Bild 11 sind die Korrelationen zwischen der Abwitterung nach 28 FTW im CDF-Verfahren der Betone B4 und der Betondruckfestigkeit bzw. einem Kennwert (K_{CDF}) dargestellt.

Bei einem Frost-Tausalz-Angriff im CDF Verfahren ist hauptsächlich mit einer Schädigung der Oberfläche (Abwitterung) zu rechnen. Entsprechend gilt in Deutschland als Abnahmekriteri-

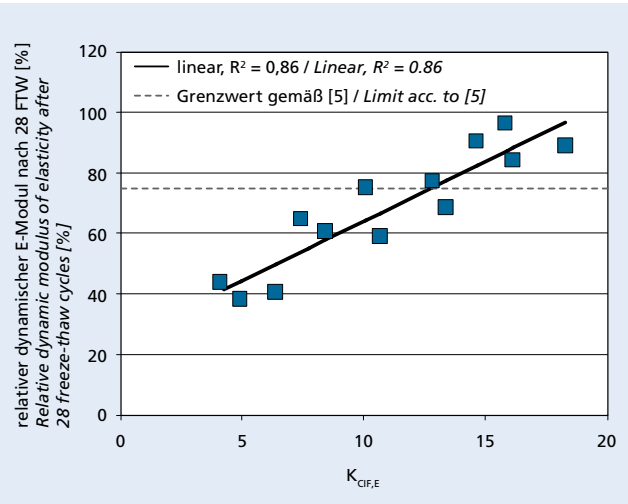


Bild 9: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (relativer dynamischer E-Modul, CIF) und dem Kennwert $K_{CIF,E}$
Figure 9: Correlation between the freeze-thaw resistance (relative dynamic elastic modulus, CIF) and the parameter $K_{CIF,E}$

According to [4], it is to be expected that a concrete that does not have the correct composition will essentially suffer internal damage to the microstructure during freeze-thaw attack by the CIF method. A relative dynamic modulus of elasticity of at least 75 % after 28 freeze-thaw cycles is therefore the essential acceptance criterion in Germany in some application sectors [1, 5]. Maximum scaling of 1.0 kg/m^2 is an additional acceptance criterion.

In Fig. 8 it is clear that the concrete compressive strength is not sufficient to provide reliable prediction of the “relative dynamic modulus of elasticity” acceptance criterion. In particular, concretes with a concrete compressive strength of about 50 to 60 MPa can exhibit significant differences in relative dynamic modulus of elasticity after 28 freeze-thaw cycles. The values here lie between 97 % and 59 % and therefore fluctuate around the acceptance criterion.

The relationship between the characteristic value $K_{CIF,E} = \frac{HG_{28d}}{P_{0,02}}$ and the relative dynamic modulus of elasticity is shown in Fig. 9. This relationship is linear. Above a characteristic value of about 14 the acceptance criterion are safely satisfied by the cements and concretes used in the research project.

3.5 Resistance to freeze-thaw with de-icing salt (CDF method)

The correlations between scaling of the B4 concrete after 28 freeze-thaw cycles in the CDF method and the concrete compressive strength and a characteristic value (K_{CDF}) are shown in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

It is to be expected that freeze-thaw attack with de-icing salt in the CDF method will mainly result in damage to the surface (scaling). The acceptance criterion in Germany is therefore usually a maximum scaling of 1.5 kg/m^2 after 28 freeze-thaw cycles [1, 5]. A relative dynamic modulus of elasticity of at least 75 % after 28 freeze-thaw cycles is an additional acceptance criterion [5]. This was satisfied by all the concretes investigated.

There is no relationship between concrete compressive strength and the scaling (Fig. 10). Fig. 11 shows the linear correlation of the scaling with the characteristic value $K_{CDF} = HG_{2d} \times L \times \frac{P_{0,01}}{P_{verl}}$. Cements with a characteristic value of $K_{CDF} < 120$ do not normally pass this test.

3.6 Carbonization behaviour of fine concretes

The carbonization tests were carried out on $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ fine concrete prisms made with Rhine gravel and Rhine sand complying with DIN EN 12620 and the A8/B8 particle size composition.

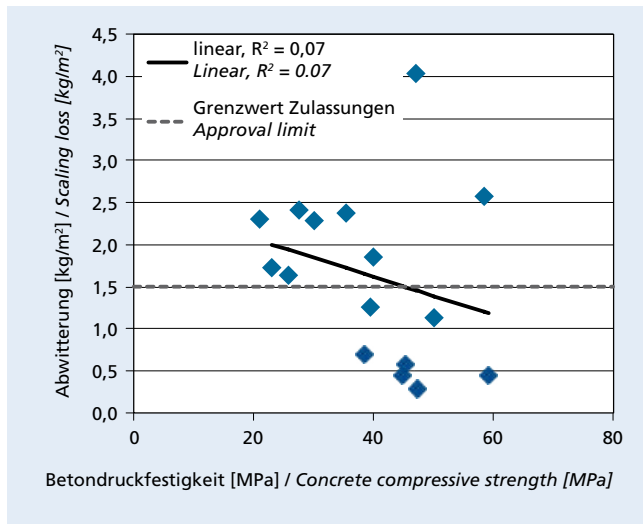


Bild 10: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und der Betondruckfestigkeit
Figure 10: Correlation between freeze-thaw resistance (scaling, CDF) and concrete compressive strength

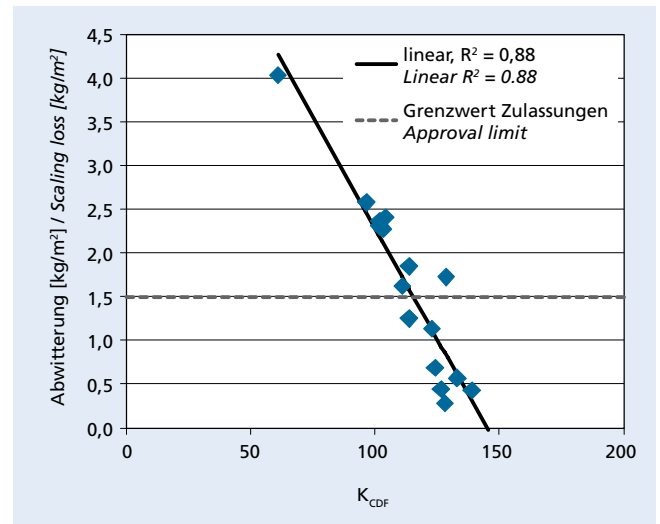


Bild 11: Korrelation zwischen dem Frostwiderstand (Abwitterung, CDF) und dem Kennwert K_{CDF}
Figure 11: Correlation between freeze-thaw resistance (scaling, CDF) and the characteristic value K_{CDF}

um üblicherweise eine maximale Abwitterung von $1,5 \text{ kg/m}^2$ nach 28 FTW [1, 5]. Als zusätzliches Abnahmekriterium gilt in [5] ein relativer dynamischer E-Modul von mind. 75 % nach 28 FTW. Dieses wird von allen untersuchten Betonen eingehalten.

Zwischen der Betondruckfestigkeit und der Abwitterung (Bild 10) besteht kein Zusammenhang. In Bild 11 ist eine lineare Korrelation der Abwitterung mit einem Kennwert $K_{CDF} = HG_{2d} \times L \times \frac{P_{0.01}}{P_{ges}}$ dargestellt. Zemente mit einem Kennwert von $K_{CDF} < 120$ bestehen diese Prüfung üblicherweise nicht.

3.6 Carbonatisierungsverhalten von Feinbetonen

Die Carbonatisierungsversuche wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ mit Rheinkies und Rheinsand nach DIN EN 12620 der Kornzusammensetzung A8/B8 durchgeführt.

Die Herstellung erfolgte nach DIN 196-1. Es wurden zehnmal drei Prismen hergestellt. Die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ vorgelagert, die an-

Ten lots of three prisms were produced and the production complied with DIN 196-1. Half the prisms were placed in preliminary storage in water at a temperature of $20 \pm 1^\circ\text{C}$ for 7 days and the other half were stored in water at a temperature of $20 \pm 1^\circ\text{C}$ for 28 days. The test pieces were then stored at a temperature of $20 \pm 2^\circ\text{C}$ and a relative humidity of $65 \pm 5\%$.

The compressive strengths of the fine concretes were determined as specified in DIN EN 196-1 at the end of the preliminary storage (7 or 28 days). Pieces about 30 mm long were split from each of three test pieces and sprayed with phenolphthalein solution to test the depth of carbonation. After about 24 h the depths of carbonation were measured on each side of the pieces that had been split off and the average depth of carbonation was calculated. The corner regions were not taken into account. The test dates were set at 14 days, 56 days, 98 days, 140 days and one year of main storage. Most of the measured values lay well below the level specified by the DIBt [1]. No attempt was made to determine characteristic values based on degree of hydration and pore radius distribution.

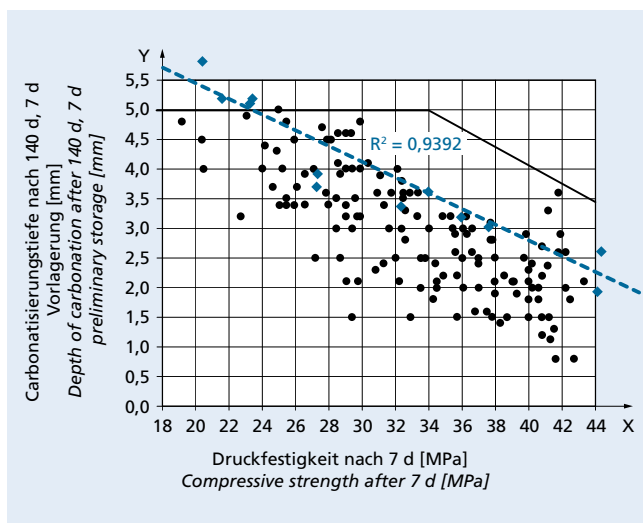


Bild 12: Carbonatisierungstiefe, 7 d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [1]
Figure 12: Depth of carbonation, 7 d preliminary storage, DIBt's evaluation background [1]

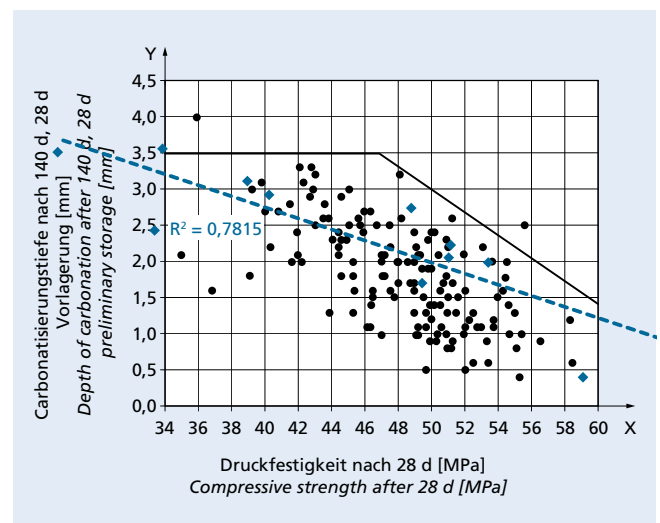


Bild 13: Carbonatisierungstiefe, 28 d Vorlagerung, Bewertungshintergrund des DIBt [1]
Figure 13: Depth of carbonation, 28 d preliminary storage, DIBt's evaluation background [1]

dere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5)\%$.

Die Druckfestigkeit der Feinbetone wurde gemäß DIN EN 196-1 im Anschluss an die Vorlagerung (7 bzw. 28 Tage) ermittelt. Zur Prüfung der Carbonatisierungstiefe wurden von jeweils drei Probekörpern ca. 30 mm lange Stücke abgespalten und mit Phenolphthaleinlösung besprüht. Nach rd. 24 Stunden wurden die Carbonatisierungstiefen jeder Seite der abgespaltenen Stücke ermittelt und die mittlere Carbonatisierungstiefe berechnet. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt. Als Prüftermine wurden 14 Tage, 56 Tage, 98 Tage, 140 Tage sowie ein Jahr Hauptlagerung festgelegt. Die ermittelten Werte ließen sich überwiegend in den Bewertungshintergrund des DIBt [1] einordnen (Bilder 12 und 13). Auf die Ermittlung von Kennwerten auf Basis des Hydratationsgrads bzw. der Porenradialverteilung wurde verzichtet.

4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Beton- bzw. Mörteldruckfestigkeit der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Zemente in den meisten Fällen nur schwache bzw. keine Orientierungswerte für die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen liefert. Auf Basis des Hydratationsgrads von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln konnten Kennwerte ermittelt werden, die geeignet erscheinen, eine Bewertung hinsichtlich des jeweiligen Abnahmekriteriums der Dauerhaftigkeitsprüfungen zu ermöglichen. Für die Bestimmung der Kennwerte sind keine Versuche am Festbeton notwendig. Die Dauerhaftigkeit der zulassungskonform zusammengesetzten Betone lässt sich anhand von Zementstein- und Mörtel Eigenschaften abschätzen.

Im Forschungsvorhaben wurde eine begrenzte Anzahl von Zementen bzw. Zementhauptbestandteilen verwendet. Die Erfahrungen müssen im Rahmen weiterer Untersuchungen bestätigt werden.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17123 N wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

4 Summary

It has been possible to show that in most cases the concrete or mortar strengths of the cements investigated in this research project provide only weak guide values or none at all for the results of the durability investigations. On the basis of the degree of hydration of the hardened cement paste and the porosity of standard mortars it was possible to identify characteristic values that seem suitable for carrying out an assessment with respect to the particular acceptance criteria of the durability tests. No tests on hardened concrete are needed for determining the characteristic values. The durability of concretes with compositions that conform to the approval test plans can be estimated with the aid of the properties of the hardened cement paste and mortar.

A limited number of cements and main cement constituents were used in the research project. Further investigations must be carried out to confirm the results.

Acknowledgement

The IGF project 17123 N was sponsored by the Federal Ministry of Economics and Energy through the AiF (Federation of Industrial Cooperative Research Associations) as part of the programme to promote Joint Industrial Research (IGF) based on a decision by the Germany Federal Parliament.

Literatur / Literature

- [1] Principles of the equivalent durability procedure. CEN/TR 16563, 2013
- [2] Chlorideindringwiderstand von Beton. Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe 2004
- [3] Locher, Friedrich W.: Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 2000
- [4] Setzer, M. J.: Frostschaden: Grundlagen und Prüfung. Beton und Stahlbetonbau 97 (2002) H. 7, S. 350-359
- [5] Frostprüfung von Beton. Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe 2004

Ingmar Borchers und Christoph Müller, Düsseldorf

Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen

Practical testing of alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in ASR performance tests

Übersicht

Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) an Betonbauwerken können vermieden werden, indem Betone eingesetzt werden, deren Alkaliempfindlichkeit gering ist. Um die Alkaliunempfindlichkeit von Betonen für Bauteile der Feuchtigkeitsklassen WF (feucht) und WA (feucht + Alkalizufuhr von außen) praxisgerecht bewerten zu können, hat der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) nun Kriterien für AKR-Performance-Prüfungen entwickelt. Dazu wurde untersucht, unter welchen Bedingungen der 60 °C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen die Festlegungen zu Maßnahmen der Alkali-Richtlinie in den Feuchtigkeitsklassen WF und WA abbildet.

1 Einleitung und Forschungsziel

Eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann Beton schädigen und die vorgesehene Nutzungsdauer der Betonbauwerke vermindern. Die Gebrauchstauglichkeit kann in diesem Fall ggf. nur durch einen hohen Instandsetzungsaufwand erhalten werden. Eine schädigende AKR tritt nicht auf, wenn die Gesteinskörnung ausreichend alkaliunempfindlich, der Beton ausreichend trocken oder der wirksame Alkaligehalt in der Porenlösung des Betons entsprechend gering ist. Die Alkalien stammen aus den Betonausgangsstoffen, vorwiegend dem Zement, und in manchen Fällen aus Tau- bzw. Enteisungsmitteln, die von außen in den Beton eindringen können. Die Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [1] legt Maßnahmen fest, die in Deutschland bei Beton nach DIN EN 206/DIN 1045-2 zur Vermeidung von AKR-Schäden anzuwenden sind. Die Maßnahmen sind in Abhängigkeit von den folgenden Parametern festgelegt:

- Alkaliempfindlichkeitsklasse der Gesteinskörnung
- Feuchtigkeitsklasse des Betonbauteils
- Zementgehalt des Betons

Zur Vermeidung von AKR-Schäden dürfen in bestimmten Fällen alkaliempfindliche Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S nur in Kombination mit einem NA-Zement nach DIN 1164-10 oder aber alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen (E I, E I-O – E I-OF oder E I-S) eingesetzt werden. Diese Festlegungen berücksichtigen alle potenziell möglichen stofflichen Kombinationen („worst-case-Betrachtung“). Es gibt also Betone, die die zuvor genannten Festlegungen nicht erfüllen, die aber dennoch in der Praxis zu keinem AKR-Schaden führen würden. Um solche Betone einsetzen zu können, ermöglicht die Alkali-Richtlinie seit der Ausgabe 2007 deren Verwendung, wenn durch ein Gutachten die Alkaliunempfindlichkeit nachgewiesen wird. Ein solches Gutachten wird i.d.R. auf einer AKR-Performance-Prüfung beruhen. Die AKR-Performance-Prüfung soll Auskunft geben, ob ein Beton in der entsprechenden Feuchtigkeitsklasse ausreichend alkaliunempfindlich ist, sodass er während der ge-

Abstract

Damage caused by an alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures can be avoided by using concrete composition with a low alkali reactivity. The German Cement Works Association (VDZ) has now developed criteria for ASR performance tests in order to make a practical evaluation of the lack of alkali reactivity of concrete composition for components of the WF (moist) and WA (moist + external supply of alkalis) moisture classes. Investigations were carried out to find the conditions under which the 60 °C concrete test with and without external supply of alkalis reproduces the requirements concerning measures in the Alkali Guidelines for the WF and WA moisture classes.

1 Introduction and research objective

An alkali silica reaction (ASR) can damage concrete and reduce the intended service life of concrete structures. In this situation the serviceability can sometimes only be retained by expensive repairs. Damaging ASR will not occur if the aggregate is sufficiently non-reactive to alkalis, the concrete is sufficiently dry or the effective alkali content in the pore solution of the concrete is appropriately low. The alkalis come from the constituents of the concrete composition, predominantly the cement, and in some cases from de-icing agents that can penetrate into the concrete from outside. The Alkali Guidelines of the DAfStb (German Committee for Structural Concrete) [1] specify measures that have to be applied in Germany for concrete compositions complying with DIN EN 206/DIN 1045-2 in order to avoid ASR damage. The measures are specified in relation to the following parameters:

- alkali reactivity class of the aggregate
- moisture class of the concrete element
- cement content of the concrete composition.

In certain cases it is only permissible to use alkali-reactive aggregates of the E III-S alkali reactivity class in combination with low-alkali cement as specified in DIN 1164-10 or other aggregates that are not reactive to alkalis (alkali reactivity class: E I, E I-O – E I-OF or E I-S) in order to avoid ASR damage. These requirements take all the potentially possible material combinations into account (“worst-case scenario”). This means that there are concrete compositions that do not fulfil the above-mentioned requirements but which, in spite of this, would not lead to any ASR damage in practice. In order to be able to use such concrete compositions the Alkali Guidelines have, since the 2007 edition, allowed their use if the lack of reactivity to alkalis is verified by an expert report. As a rule, such an expert report is based on an ASR performance test. The ASR performance test should provide information about whether a concrete composition is sufficiently non-reactive to alkalis in the appropriate moisture class so that it will not be damaged by an ASR during the planned service life. The ASR performance

Tafel 1: Gesteinskörnungen und Dehnungen im 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie in mm/m

Table 1: Aggregates and expansions in mm/m in the 60 °C concrete test as specified in the Alkali Guidelines

Gesteinskörnung Aggregate	Alkaliempfindlichkeitsklasse Alkali reactivity class	Dehnung im 60 °C-Betonversuch Expansion in the 60 °C concrete test
Rheinkies <i>Rhine gravel</i>	E I	0,24
Rhyolith-Splitt <i>Crushed rhyolite</i>	E I–S	0,07
Kies-Edelsplitt vom Oberrhein <i>Crushed gravel from the Upper Rhine Graben</i>	E III–S	1,22
Grauwacke-Splitt <i>Crushed greywacke</i>	E III–S	2,04
Natursand <i>Natural sand</i>	E I	–

planten Nutzungsdauer nicht durch eine AKR geschädigt wird. Die AKR-Performance-Prüfverfahren und die Bedingungen für den Konformitätsnachweis sind bisher nicht in der Alkali-Richtlinie beschrieben. CEN/TR 16349 sieht grundsätzlich die Möglichkeit vor, die Alkaliempfindlichkeit eines Betons mithilfe von AKR-Performance-Prüfungen zu beurteilen [2], enthält aber ebenfalls keine weiteren Details. Der 60 °C-Betonversuch (ohne Alkalizufuhr) ist seit 2004 in AFNOR P 18-454 [3] genormt und wird in Frankreich und der Schweiz zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen angewendet [4, 5].

Bevor auch in Deutschland AKR-Performance-Prüfungen Eingang in die Alkali-Richtlinie finden können, muss der Nachweis erbracht werden, dass Betone, die nach den Regeln der Alkali-Richtlinie zusammengesetzt und anwendbar sind, auch entsprechend bewertet werden. Die Festlegungen der Alkali-Richtlinie spiegeln die Erfahrungen mit Betonen in Deutschland wider, die entweder keine AKR-Schäden aufweisen oder mit denen nachweislich AKR-Schäden aufgetreten sind. Mit der Alkali-Richtlinie können Hoch- und Ingenieurbauwerke mit regional verfügbaren Betonausgangsstoffen sicher gebaut werden.

Im IGF-Vorhaben 16569 N wurden der

- „60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr“ zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF (feuchte Bauteile) und der
- „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WA (feuchte Bauteile, die einer Alkalizufuhr von außen durch Natriumchlorid ausgesetzt sind)

verwendet.

Um festzustellen, unter welchen Bedingungen die Prüfverfahren die Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklassen WF und WA in Übereinstimmung mit den Festlegungen der Alkali-Richtlinie abbilden, wurden Betone entsprechend den Festlegungen der Alkali-Richtlinie zusammengesetzt und unter Variation der Prüfbedingungen (Vorlagerung und Natriumchlorid-Konzentration) untersucht.

2 Untersuchungen

2.1 Ausgangsstoffe und Betone

Mit groben Gesteinskörnungen 2/16 mm unterschiedlicher Alkaliempfindlichkeitsklassen (Tafel 1) wurden in Kombination mit verschiedenen Zementen (Tafel 2) Betone hergestellt. Der Zementgehalt betrug 300, 350, 370, 400 oder 430 kg/m³ und der Wasserzementwert lag bei 0,42 oder 0,45. Sand wurde in allen Betonen zu rd. 30 Vol.-% eingesetzt. Von der groben Gesteinskörnung wurden in der Regel 40 Vol.-% der Korngruppe 2/8 und 30 Vol.-% der Korngruppe 8/16 verwendet. Tafel 1 zeigt die Dehnung der groben Gesteinskörnungen im 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie. Die Dehnung der Grauwacke E III-S und des Kies-Edelsplitts vom Oberrhein E III-S lag im Alter von 140 Tagen deut-

test methods and the conditions for attestation of conformity have not yet been described in the Alkali Guidelines. CEN/TR 16349 allows, in principle, for the possibility of assessing the alkali reactivity with the aid of ASR performance tests [2] but contains no further details. The 60 °C concrete test (without alkali supply) has, since 2004, been included in the AFNOR P 18-454 standard [3] and is used in France and Switzerland for evaluating the alkali reactivity of concrete compositions [4, 5].

Before the ASR performance tests can also find their way into the Alkali Guidelines in Germany it must be proved that concrete compositions that are composed, and can be used, in accordance with the rules in the Alkali Guidelines can also be evaluated appropriately. The requirements in the Alkali Guidelines reflect the experience in Germany with concrete compositions that either exhibit no ASR damage or with which ASR damage has been shown to occur. Using the Alkali Guidelines it is possible to construct buildings and civil engineering works safely with regionally available concrete constituents.

The following tests were used in the IGF project 16569 N:

- “the 60 °C concrete test without alkali supply” for evaluating the alkali reactivity of concrete compositions of the WF moisture class (environment: concrete element is exposed to extraneous moisture, complies with E2 of CEN/TR 16349 [2]) and
- “the 60 °C concrete test with alkali supply” for evaluating the alkali reactivity of concrete compositions of the WA moisture class (environment: concrete element is exposed to extraneous moisture and to external supply of alkalis, complies with E3 of CEN/TR 16349 [2]).

In order to establish the conditions under which the test methods reproduce the lack of reactivity to alkalis of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in agreement with the requirements of the Alkali Guidelines, concretes were made up in accordance with the requirements of the Alkali Guidelines and examined under varying test conditions (preliminary storage and sodium chloride concentration).

2 Investigations

2.1 Initial constituents and concrete compositions

Concrete compositions were produced with coarse 2/16 mm aggregates of different alkali reactivity classes (Table 1) in combination with various cements (Table 2). The cement content was 300, 350, 370, 400 or 430 kg/m³ and the water/cement ratio was 0.42 or 0.45. Sand was used in all the concrete compositions at about 30 vol. %. As a rule the coarse aggregate contained 40 vol. % of the 2/8 particle size group and 30 vol. % of the 8/16 particle size group. Table 1 shows the expansion of the coarse aggregates in the 60 °C concrete test as specified in the Alkali Guidelines. After 140 d the expansion of the reactive greywacke (E III-S) and of the reactive crushed gravel from the Upper Rhine Graben (E III-S) lay significantly above the limit value of 0.30 mm/m. The non-reactive

Tafel 2: Zemente, Zusammensetzung und Na₂O-Äquivalent
 Table 2: Cements, composition and Na₂O-equivalent

Zement/Cement		Anteil ¹⁾ /Bestandteil [M.-%] Proportion ¹⁾ /constituent [mass %]	Na ₂ O-Äquivalent [M.-%] Na ₂ O-equivalent [mass %]		
			Zement ohne S Cement without S	S, FA	Gesamtzement Total cement
1	CEM I 42,5 R	–	–	–	1,19
2	CEM I 42,5 R	–	–	–	1,01
3	CEM I 42,5 R	–	–	–	0,99
4	CEM I 42,5 N	–	–	–	0,81
5	CEM I 42,5 N	–	–	–	0,62
6	CEM III/A [42,5 R]	44 S	1,19	0,61	0,94
7	CEM III/A [42,5 N]	44 S		0,92	1,07
8	CEM I 32,5 R	–	–	–	0,89
9	CEM I 42,5 N (st)	–	–	–	0,67
10	CEM I 42,5 N-NA	–	–	–	0,56
11	CEM I 42,5 R (1) + 20 M.-%/mass % FA		–	2,47	1,19
12	CEM I 42,5 R (1) + 30 M.-%/mass % FA		–		

S: Hüttensand, FA: Flugasche/S: granulated blastfurnace slag, FA: fly ash
 []: Festigkeitsklasse des Laborzements/[]: strength class of the laboratory cement
¹⁾ Anteil bezogen auf den sulfatträgerfreien Zement/¹⁾ Proportion relative to the cement without sulfate agent

lich über dem Grenzwert von 0,30 mm/m. Der Rheinkies E I und der Rhyolith E I-S zeigten Dehnungen unterhalb des Grenzwerts.

2.2 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr

Die Betone für die Feuchtigkeitsklasse WF wurden mit dem „60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr“ geprüft. Der Prüfablauf entspricht dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Anhang C [1]. Die Prüfungen wurden als bestanden bewertet, wenn die Dehnungen im Alter von 140 Tage $\leq 0,20$ mm/m betrugen. Dieser Orientierungswert wurde in Anlehnung an AFNOR FD P 18-456 [4] gewählt. Bei flugaschehaltigen Betonen wurde die Dehnung in Anlehnung an AFNOR FD P 18-456 mit den Orientierungswerten von 0,20 mm/m nach 140 Tagen und 0,30 mm/m nach 52 Wochen verglichen. In einigen Fällen wurden zusätzliche Untersuchungen mit einer Vorlagerung von 28 bzw. 91 Tagen anstelle von nur einem Tag durchgeführt.

2.3 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Die Betone für die Feuchtigkeitsklasse WA wurden mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ von außen geprüft [6, 7]. Das Prüfverfahren wurde ursprünglich zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für Fahrbahndecken aus Beton (Feuchtigkeitsklasse WS) entwickelt. Hier wurde das Verfahren zur Bewertung von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WA mit einer 3 %igen bzw. einer 10 %igen Natriumchlorid-Lösung (NaCl) verwendet, um das Verfahren auf die Feuchtigkeitsklasse WA anzupassen und eine praxisgerechte Bewertung zu erzielen. Bei einigen Betonen wurde zusätzlich eine Prüfung mit einer Vorlagerung von 91 Tagen durchgeführt.

2.4 Freilagerlagerung

Um die Ergebnisse der Laboruntersuchungen mit dem Verhalten der Betone unter praktischen Bedingungen vergleichen zu können, lagerten einige Betone zusätzlich im Freilager. Die Prüfung wird seit den 1970er-Jahren in dieser Form durchgeführt [8].

Rhine gravel (E I) and the non-reactive rhyolite (E I-S) exhibited expansions below the limit value.

2.2 60 °C concrete test without alkali supply

The concrete compositions for the WF moisture class (wet environment) were tested with the “60 °C concrete test without alkali supply”. The test procedure corresponded to the 60 °C concrete test as specified in the Alkali Guidelines, Appendix C [1] that is based on AFNOR P 18-454 standard [3]. The tests were evaluated as passed if the expansions after 140 d were $\leq 0,20$ mm/m. This limit value was chosen on the basis of AFNOR FD P 18-456 [4]. For concrete compositions containing fly ash the expansion based on AFNOR FD P 18-456 was compared with the limit values of 0,20 mm/m after 140 d and 0,30 mm/m after 52 weeks. Additional investigations were carried out in some cases with preliminary storage of 28 or 91 d instead of only one day.

2.3 60 °C concrete test with alkali supply

The concrete compositions for the WA moisture class (wet environment + external alkali supply) were tested with the “60 °C concrete test with external alkali supply” [6, 7]. The test method was originally developed for evaluating the alkali reactivity of concrete compositions for concrete road surfaces (WS moisture class: wet environment + external alkali supply + dynamic loads). The method was used here for evaluating concrete compositions for the WA moisture class with a 3 % or 10 % sodium chloride solution (NaCl) in order to adapt the method to the WA moisture class and achieve a practical method of evaluation. Tests were also carried out with a preliminary storage time of 91 d for some concrete compositions.

2.4 Storage in the outdoor exposure site

Some concrete compositions were also stored in the outdoor exposure site in order to compare the results of the laboratory investigations with the behaviour of the concrete compositions under practical conditions. The testing has been carried out in this way since the 1970s [8].

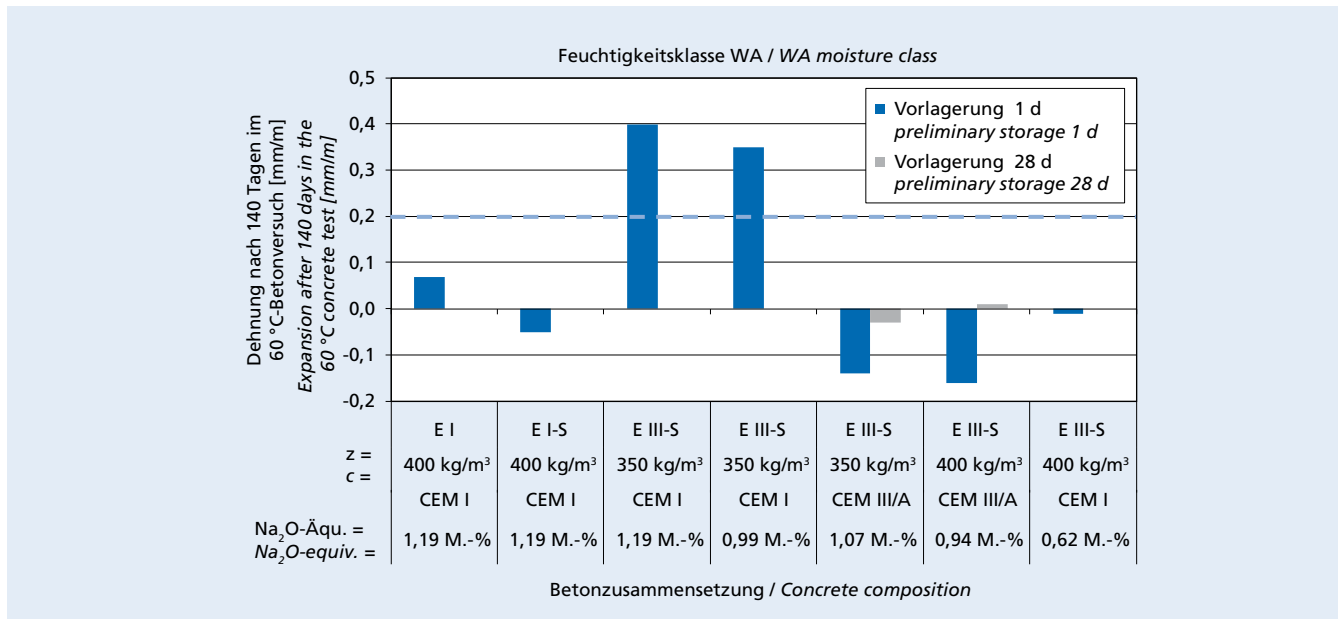


Bild 1: Dehnung unterschiedlicher Betone nach 140 Tagen im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr, 1 Tag Vorlagerung bei 20 °C/100 % r. F. (blau) und 28 Tage Vorlagerung bei 20 °C/100 % r. F. (grau), Orientierungswert in Anlehnung an AFNOR FD P 18-456 [4]

Figure 1: Expansion of various concrete compositions after 140 days in the 60 °C concrete test without external alkali supply, 1 day preliminary storage at 20 °C/100 % r.h. (blue) and 28 days preliminary storage at 20 °C/100 % r.h. (grey), limit based on AFNOR FD P 18-456 [4]

3 Ergebnisse

3.1 Feuchtigkeitsklasse WF

Es wurden Betone entsprechend den Festlegungen der Alkali-Richtlinie zusammengesetzt. Gemäß Alkali-Richtlinie sind bei diesen Betonen in Bauwerken, die feuchter Umgebung ausgesetzt sind, während einer Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren keine AKR-Schäden zu erwarten. In Bild 1 sind die Dehnungen nach 140 Tagen im 60 °C-Betonversuch zusammengefasst. Die Betone mit Hochofenzementen lagerten vor Beginn der Prüfung z.T. 28 Tage bei 20 °C und 100 % r. F. (graue Werte).

Die Ergebnisse zeigen, dass fünf Betone bei Ansatz des Orientierungswerts von 0,20 mm/m gemäß AFNOR FD P 18-456 [4] die Prüfung bestanden. Zwei Betone (E III-S, z = 350 kg/m³ und CEM I) zeigten Dehnungen über dem Orientierungswert. In diesen Fällen läge das Ergebnis des „60 °C-Betonversuchs ohne Alkalizufuhr“ auf der sicheren Seite. Es wird empfohlen, den Orientierungswert zunächst nicht zu verändern, da Untersuchungen in der Schweiz zeigen, dass mit dem Verfahren angemessen zwischen nicht reaktiven und potenziell reaktiven Betonen unterschieden werden kann, wenn die Betone mit Portlandzement hergestellt werden [9, 10]. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

Betone mit alkaliunempfindlichen Gesteinskörnungen (E I und E I-S) bestanden den 60 °C-Betonversuch, auch wenn der Zementgehalt mit 400 kg/m³ und das Na₂O-Äquivalent des Zements mit 1,19 M.-% hoch waren. In beiden Fällen bildet das Prüfverfahren die Festlegung der Alkali-Richtlinie richtig ab, die für die Alkaliempfindlichkeitsklassen E I und E I-S keine Anforderungen an den Alkaligehalt des Zements und den Zementgehalt festlegt.

Bei Beton der Feuchtigkeitsklasse WF, einem Zementgehalt von 400 kg/m³ und Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S muss gemäß Alkali-Richtlinie ein NA-Zement eingesetzt werden. Deshalb wurde ein Beton mit Grauwacke-Splitt (E III-S) und Portlandzement mit einem Na₂O-Äquivalent von 0,62 M.-% untersucht. Das Na₂O-Äquivalent liegt nur geringfügig über der Grenze von 0,60 M.-%, die gemäß DIN 1164-10 für Portlandzement mit einem „niedrigen wirksamen Alkaligehalt“ gilt. Der Beton zeigt keine Dehnungen. Der 60 °C-Betonversuch bildet damit die Festlegung der Alkali-Richtlinie richtig ab.

Auch Beton mit einem hüttensandhaltigen Laborzement, der die Anforderungen an NA-Zemente nach DIN 1164-10 erfüllt, bestand die Prüfung und wurde entsprechend der Alkali-Richt-

3 Results

3.1 WF moisture class

Concrete compositions were made up in accordance with the requirements of the Alkali Guidelines. According to the Alkali Guidelines these concretes are not expected to exhibit any ASR damage in structures that are exposed to a moist environment during a service life of at least 50 years. The expansions after 140 d in the 60 °C concrete test are summarized in Fig. 1. In some cases the concrete compositions containing blastfurnace cements were stored for 28 d at 20 °C and 100 RH (grey values) before the start of the test.

The results show that five concrete compositions passed the test when employing the limit value of 0.20 mm/m as specified in AFNOR FD P 18-456 [4]. Two concrete compositions (E III-S, c = 350 kg/m³, and CEM I cement) exhibited expansions above the limit value. In these cases the results of the “60 °C concrete test without alkali supply” lay on the safe side. It is recommended that the limit value should not be changed initially because investigations in Switzerland show that with this method it is possible to differentiate appropriately between non-reactive and potentially reactive concrete compositions if the concrete compositions are produced with Portland cement [9, 10]. The results are discussed in detail below.

Concrete compositions containing aggregates that are non-reactive to alkalis (E I and E I-S) passed the 60 °C concrete test even though the cement content of 400 kg/m³ and the Na₂O-equivalent of the cement of 1.19 mass % were high. In both cases the test method correctly reproduces the requirements of the Alkali Guidelines that do not lay down any requirements for the alkali content of the cement or for the cement content for the E I and E I-S alkali reactivity classes (non-reactive aggregates).

According to the Alkali Guidelines, low-alkali cement must be used for concrete compositions in the WF moisture class with a cement content of 400 kg/m³ and reactive aggregates in the E III-S alkali reactivity class. An investigation was therefore carried out on a concrete composition containing crushed greywacke (E III-S) and Portland cement with Na₂O-equivalent of 0.62 mass %. The Na₂O-equivalent lies only slightly above the limit of 0.60 mass % that, according to DIN 1164-10, applies to Portland cement with low-alkali content. The concrete composition exhibited no expan-

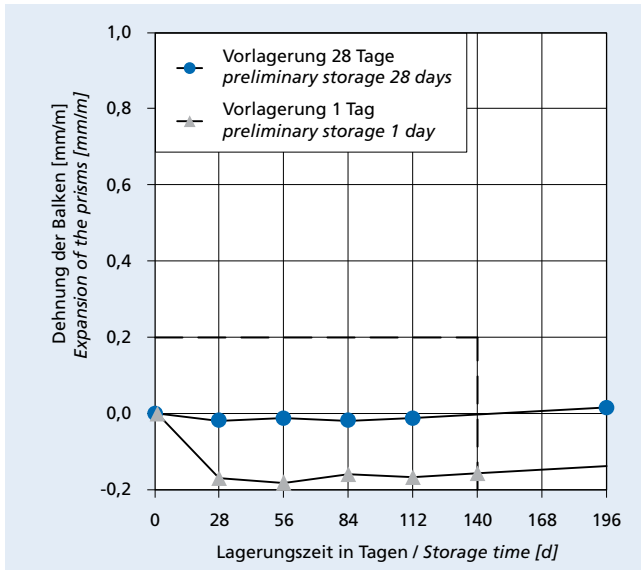


Bild 2: Dehnung eines Betons mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und CEM III/A 42,5 R (Laborzement) im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr bei verschiedenen Vorlagerungen. CEM III/A 42,5 R, Na_2O -Äqu. = 0,94 M.-%, $z = 400 \text{ kg/m}^3$, w/z -Wert = 0,45, 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke E III-S 2/16. *Figure 2:* Expansion of a concrete composition made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and CEM III/A 42,5 R (laboratory cement) in the 60 °C concrete test without alkali supply. Concrete with different preliminary storage times. CEM III/A 42,5 R cement, Na_2O -equiv. = 0,94 mass %, $c = 400 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0,45, 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % greywacke E III-S 2/16

linie bewertet (Bild 2). Bei hüttensandhaltigen Zementen zeigt der Beton innerhalb der ersten 28 Tage zunächst Schwindverformungen, wenn er im Alter von einem Tag in die Prüfruhe bei 60 °C über Wasser eingelagert wurde. Würde eine Dehnung infolge AKR in den ersten 28 Tagen auftreten, könnte nicht zwischen dem Schwinden und der AKR-Dehnung differenziert werden. Wird dem Beton durch eine Vorlagerung von 28 Tagen bei 20 °C Zeit gegeben zu hydratisieren, verringert sich die Schwinddehnung in der Prüfung deutlich. Bei Betonen mit hüttensandhaltigen und flugaschehaltigen Zementen ist eine Vorlagerung von 28 Tagen aus diesem Grund zu empfehlen.

In Bild 3 ist u.a. die Dehnung eines Betons im Freilager dargestellt, der mit einer präkambrischen Grauwacke der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und CEM III/A hergestellt wurde. Nach 17 Jahren traten weder Risse noch Dehnungen auf. Im Vergleich dazu traten Dehnungen und Risse auf, wenn statt des CEM III/A ein CEM I mit einem hohen Alkaligehalt verwendet wird. Das Ergebnis bestätigt, dass bei dem in Bild 2 gezeigten Beton auch unter praxisnahen Bedingungen keine schädigende AKR zu erwarten ist.

In einem zweiten Schritt wurden Betone untersucht, die nur zum Teil die Anforderungen der Alkali-Richtlinie erfüllen. Bild 4 zeigt die Dehnungen von Betonen, die mit dem Grauwacke-Splitt E III-S, einem Zementgehalt von 370 kg/m^3 und in Kombination mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden. Die Alkali-Richtlinie legt für diesen Fall fest, dass ein NA-Zement eingesetzt werden muss. Mit dem Prüfverfahren konnte gut zwischen Betonen mit verschiedenen Zementen und Alkaligehalten unterschieden werden. In der vorliegenden Materialkombination und Betonzusammensetzung könnte auf die Verwendung eines NA-Zements verzichtet werden. Ein Alkaligehalt des Portlandzements (Na_2O -Äquivalent) von 0,90 M.-% wäre aber bereits zu hoch.

Im dritten Schritt wurden flugaschehaltige Betone mit einer alkalireaktiven Gesteinskörnung (E III-S) untersucht. Die Dehnungen des Betons mit 280 kg/m^3 Portlandzement und 120 kg/m^3 Flugasche überschreiten die Orientierungswerte nach 140 Tagen ($\leq 0,20 \text{ mm/m}$) und 52 Wochen ($\leq 0,30 \text{ mm/m}$) nicht (Bild 5). Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit den Festlegungen

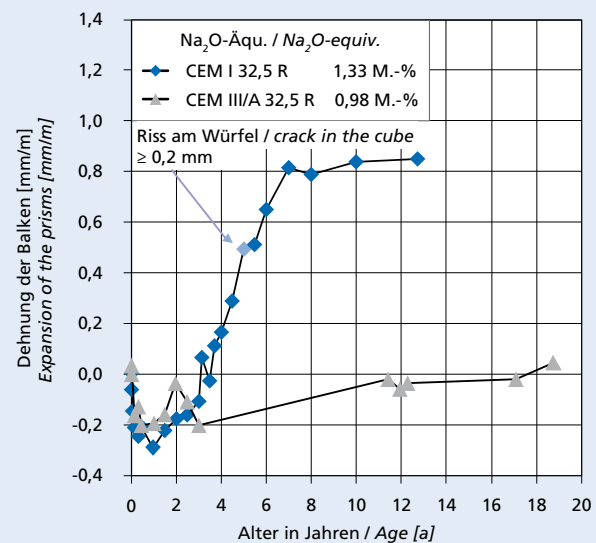


Bild 3: Dehnung eines Betons mit präkambrischer Grauwacke der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S mit verschiedenen Zementen im Freilager. $z = 500 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,45$, 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% präkambrische Grauwacke E III-S 2/16. *Figure 3:* Expansion of a concrete composition made with crushed precambrian greywacke of the E III-S alkali reactivity class and various cements, stored in the outdoor exposure site. $c = 500 \text{ kg/m}^3$, $w/c = 0,45$, 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % crushed precambrian greywacke E III-S 2/16

sions. The 60 °C concrete test therefore correctly reproduces the requirements of the Alkali Guidelines.

A concrete composition made with laboratory cement containing granulated blastfurnace slag that fulfils the requirements for low-alkali cements as specified in DIN 1164-10 also passed the test and the evaluation corresponded to the Alkali Guidelines (Fig. 2). With cements containing granulated blastfurnace slag the concrete initially exhibited shrinkage deformation within the first 28 d when it was stored above water at 60 °C in the test reactor at the age of one day. If expansion due to an ASR occurred in the first 28 d it would not be possible to differentiate between the shrinkage and the ASR expansion. The shrinkage during the test is significantly reduced if the concrete is exposed to hydration through preliminary storage at 20 °C for 28 d. Preliminary storage for 28 d is therefore to be recommended for concrete compositions made with cements containing granulated blastfurnace slag and fly ash.

Fig. 3 shows, among other things, the expansion of a concrete in the outdoor exposure site that was produced with a Precambrian greywacke of the E III-S alkali reactivity class and CEM III/A cement. Neither cracks nor expansion had occurred after 19 years. In contrast to this, expansion and cracks occurred when a CEM I cement with high alkali content was used instead of the CEM III/A cement. This result confirms that no damaging ASR is to be expected under practical conditions with the concrete composition shown in Fig. 2.

Concrete compositions that only partially fulfil the requirements of the Alkali Guidelines were investigated in a second stage. Fig. 4 shows the expansions of concrete compositions that were produced with the E III-S crushed greywacke and a cement content of 370 kg/m^3 in combination with various cements. The Alkali Guidelines stipulate that low-alkali cement must be used in this situation. With the test method it was possible to differentiate well between concrete compositions made with different cements and alkali contents. The use of low-alkali cement could be dispensed with the above-mentioned material combination and concrete composition. However, an alkali content of the Portland cement (Na_2O -equivalent of 0,90 mass %) would be too high.

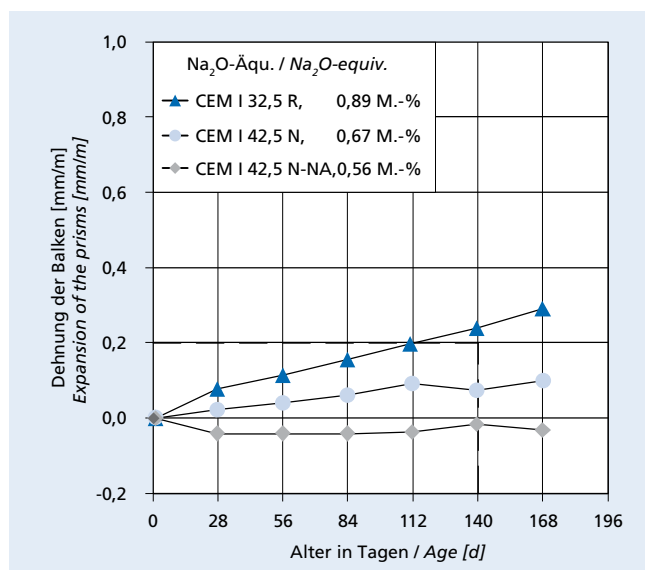


Bild 4: Dehnung unterschiedlicher Betone mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und unterschiedlichen Portlandzementen im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr. $z = 370 \text{ kg/m}^3$, w/z -Wert = 0,42, $LP = 4,5 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$, 31 Vol.-% Sand 0/2, 69 Vol.-% Grauwacke-Splitt E III-S 2/22

Figure 4: Expansion of various concrete compositions made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and various Portland cements in the 60 °C concrete test without alkali supply. $c = 370 \text{ kg/m}^3$, $w/c \text{ ratio} = 0.42$, air voids = $4.5 \pm 0.5 \text{ vol. \%}$, 31 vol. % sand 0/2, 69 vol. % crushed greywacke E III-S 2/22

der Alkali-Richtlinie zu sehen, die für diesen Fall keine Anforderung festlegt, da der Zementgehalt $\leq 350 \text{ kg/m}^3$ beträgt. Die Alkali-Richtlinie legt bei Zementgehalten $> 350 \text{ kg/m}^3$ die Verwendung eines NA-Zements fest.

Der Beton mit 320 kg/m^3 Portlandzement und 80 kg/m^3 Flugasche zeigt deutlich höhere Dehnungen (Bild 5). Die Dehnungen liegen sowohl nach 140 Tagen als auch nach 52 Wochen über den Orientierungswerten. Nach Alkali-Richtlinie darf dieser Beton ohne weitere Maßnahmen angewendet werden, da der Zementgehalt weniger als 350 kg/m^3 beträgt. Das Prüfverfahren bewertet

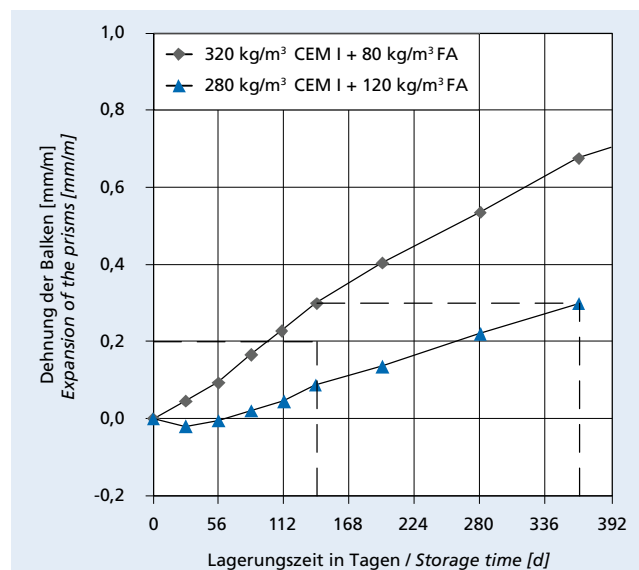


Bild 5: Dehnung eines Betons mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S, Portlandzement und Flugasche (FA) im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr bei einer Vorlagerung von 28 Tagen. CEM I 42,5, $z + f = 400 \text{ kg/m}^3$, Na_2O -Äqu. CEM I = 1,19 M.-%, $w/(z + f) = 0,45$ ($k = 1,0$), 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke E III-S 2/16

Figure 5: Expansion of a concrete composition made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class, Portland cement and fly ash (FA) in the 60 °C concrete test without alkali supply, with a preliminary storage time of 28 days. CEM I 42,5 cement, $c + f = 400 \text{ kg/m}^3$, Na_2O -equiv. CEM I = 1.19 mass %, $w/(c + f) = 0.45$ ($k = 1.0$), 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % greywacke E III-S 2/16

Concrete compositions containing fly ash and an alkali-reactive aggregate (E III-S) were investigated in a third stage. The expansions of the concrete composition made with 280 kg/m^3 Portland cement and 120 kg/m^3 fly ash did not exceed the limit values after 140 d ($\leq 0.20 \text{ mm/m}$) and 52 weeks ($\leq 0.30 \text{ mm/m}$) (Fig. 5). The results can be regarded as being in compliance with the stipulations of the Alkali Guidelines that do not lay down any requirements for this case because the cement content is $\leq 350 \text{ kg/m}^3$. The Alkali Guidelines stipulate the use of low-alkali cement for cement contents $> 350 \text{ kg/m}^3$.

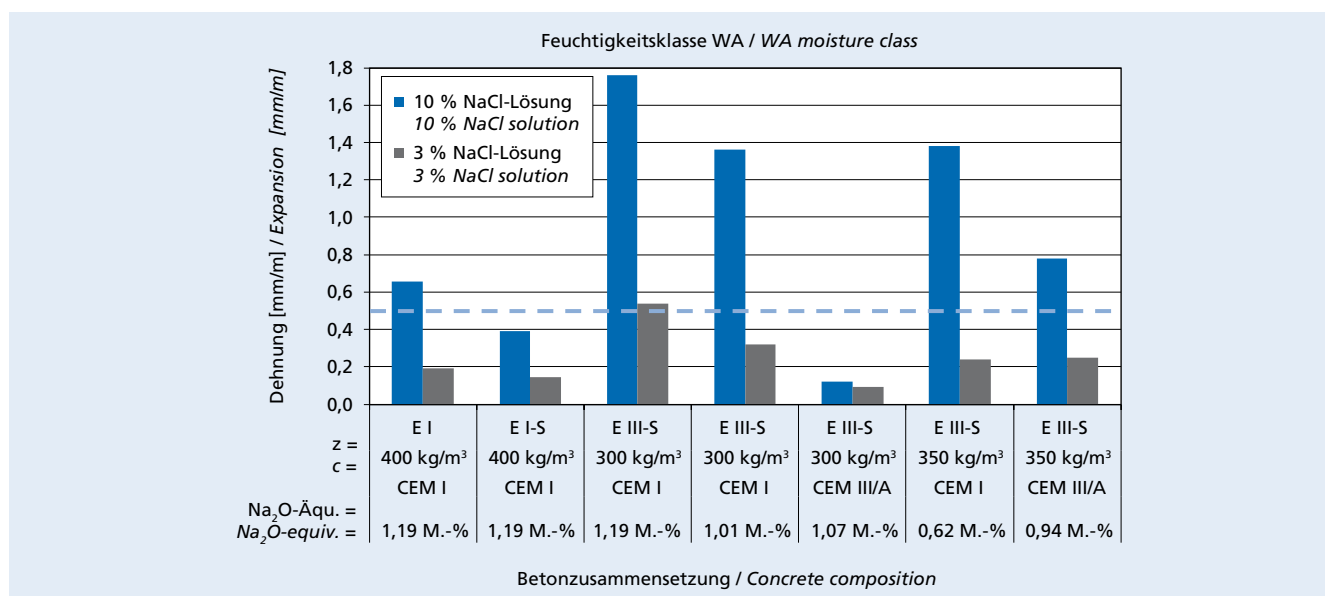


Bild 6: Dehnung unterschiedlicher Betone nach zehn Zyklen der Wechsellagerung im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige (grau) und eine 10 %ige Natriumchloridlösung (blau)

Figure 6: Expansion of various concrete compositions after ten cycles of alternating storage in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % (grey) and a 10 % (blue) sodium chloride solution

damit bei Ansatz der verwendeten Orientierungswerte Betone auf der sicheren Seite liegend.

3.2 Feuchtigkeitsklasse WA

In Bild 6 sind die Dehnungen nach zehn Zyklen der Wechsellaagerung für verschiedene Betone bei einer Alkalizufuhr durch eine 3 %ige und eine 10 %ige Natriumchlorid-Lösung dargestellt. Die Betone entsprechen den Festlegungen der Alkali-Richtlinie. Ein AKR-Schaden ist nicht zu erwarten. Bei einer 10 %igen NaCl-Lösung weisen vier der sieben Betone nach zehn Zyklen der Wechsellaagerung Dehnungen auf, die über dem Grenzwert von 0,50 mm/m liegen. In diesem Fall würden die Betone von einer Verwendung ausgeschlossen werden, obwohl sie nach Alkali-Richtlinie eingesetzt werden dürften. Die Prüfung mit einer 10 %igen NaCl-Lösung erscheint daher nicht sachgemäß.

Werden die Betone mit einer 3 %igen Natriumchlorid-Lösung geprüft, liegen die Dehnungen bei sechs von sieben Betonen unter dem Grenzwert. Ein Beton weist Dehnungen auf, die knapp über dem Grenzwert liegen. Mit einer 3 %igen Natriumchlorid-Lösung werden Betone auf der Basis dieser Ergebnisse praxisgerecht bewertet. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Betonversuche mit einer 3 %igen Natriumchlorid-Lösung dargestellt und diskutiert.

Bei einem Beton mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und einem Zementgehalt von 300 kg/m³ sind gemäß Alkali-Richtlinie keine Maßnahmen anzuwenden. Bild 7 zeigt die Dehnungen von Betonen, die mit verschiedenen Zementen hergestellt wurden. Wie bereits oben beschrieben, überschreitet die Dehnung den Grenzwert bei einem hohen Na₂O-Äquivalent von 1,19 M.-% geringfügig. Gemäß diesem Ergebnis werden die Festlegungen der Alkali-Richtlinie auf der sicheren Seite liegend mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr abgebildet. Nicht alle Betone, die den Festlegungen der Alkali-Richtlinie entsprechen, würden die Prüfung bestehen.

In Bild 8 sind die Dehnungen von Betonen dargestellt, die aufgrund des Zementgehalts von 350 kg/m³ gemäß Alkali-Richtlinie nur mit NA-Zementen verwendet werden dürfen. Einer der verwendeten Portlandzemente CEM I wies ein Na₂O-Äquivalent von 0,62 M.-% auf und lag damit an der Grenze zum NA-Zement.

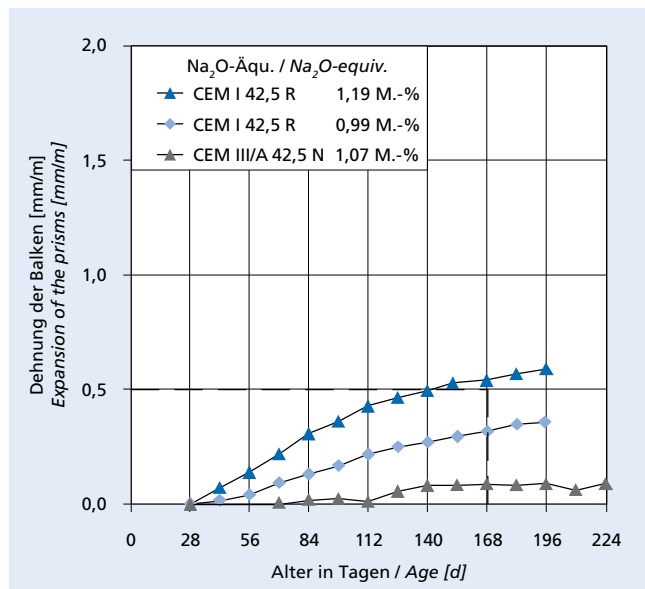


Bild 7: Dehnung von Betonen mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und verschiedenen Zementen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung. $z = 300 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,45, 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke-Splitt E III-S 2/16

Figure 7: Expansion of concrete compositions made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and various cements in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution. $c = 300 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.45, 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % crushed greywacke E III-S 2/16

The concrete composition containing 320 kg/m³ Portland cement and 80 kg/m³ fly ash exhibited significantly higher expansions (Fig. 5). After both 140 d and 52 weeks the expansions lay above the limit values. According to the Alkali Guidelines this concrete composition may be used without further measures because the cement content is $\leq 350 \text{ kg/m}^3$. This means that when the limit values are applied then the evaluations of the concrete compositions by the test method lie on the safe side.

3.2 WA moisture class

The expansions after ten cycles of alternating storage are shown in Fig. 6 for various concrete compositions with supply of alkalis through a 3 % and a 10 % sodium chloride solution. The concrete compositions correspond to the requirements of the Alkali Guidelines. ASR damage is not to be expected. With a 10 % NaCl solution four of the seven concrete compositions exhibited expansions after 10 cycles of alternating storage that lay above the limit of 0.50 mm/m. In this case the concrete compositions would be debarred from use although, according to the Alkali Guidelines, their use would be permitted. Testing with a 10 % NaCl solution does not therefore appear to be appropriate.

If the concrete compositions are tested with a 3 % sodium chloride solution the expansions lie under the limit value for six of the seven concretes. One concrete exhibits expansions that lie just over the limit value. On the basis of these results the evaluation of concrete compositions using a 3 % sodium chloride solution is in line with practical experience. The results of the concrete tests with a 3 % sodium chloride solution are presented and discussed below.

According to the Alkali Guidelines it is not necessary to apply any measures for a concrete composition with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and a cement content of 300 kg/m³. Fig. 7 shows the expansions of concrete compositions produced with various cements. As already described above, the expansion exceeds the limit value slightly with a high Na₂O-equivalent of 1.19 mass %. This result shows that the requirements of the Alkali Guidelines are reproduced on the safe side by the 60 °C concrete test with alkali supply. However, not all the concrete compositions

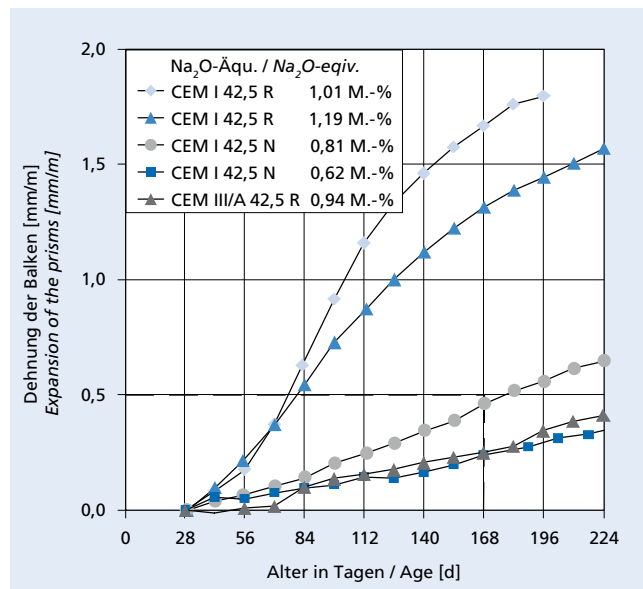


Bild 8: Dehnung von Betonen mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und verschiedenen Zementen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung. $z = 350 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,45, 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke-Splitt E III-S 2/16

Figure 8: Expansion of concrete compositions made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and various cements in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution. $c = 350 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.45, 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % crushed greywacke E III-S 2/16

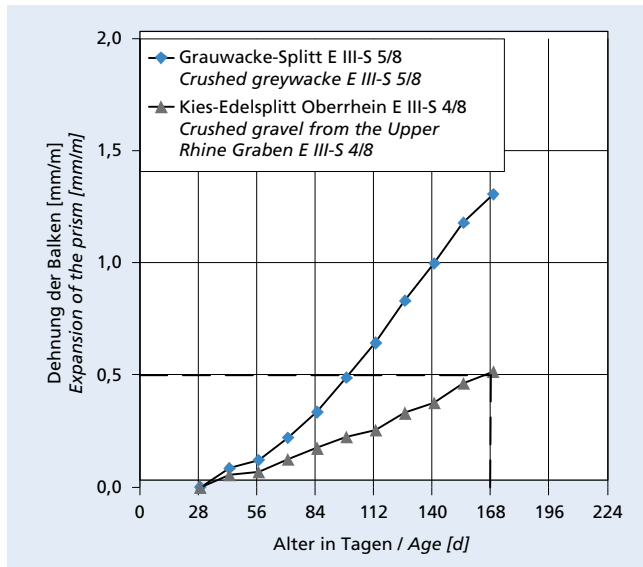


Bild 9: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung. CEM I 42,5 N, Na_2O -Äquivalent = 0,62 M.-%, $z = 430 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,42, LP = $5,5 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$, 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke-Splitt E III-S 5/8 bzw. Kies-Edelsplitt E III-S 4/8

Figure 9: Expansion of concrete compositions made various aggregates of the E III-S alkali reactivity class in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution. CEM I 42,5 N cement, Na_2O -equivalent = 0.62 mass %, $c = 430 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.42, air voids = $5.5 \pm 0.5 \text{ vol. \%}$, 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % crushed greywacke E III-S 5/8 or crushed gravel from the Upper Rhine Graben E III-S 4/8

Der CEM III/A (Laborzement) erfüllte mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,94 M.-% ebenfalls die Anforderung für einen NA-Zement. Beide Betone bestanden mit einer 3 %igen NaCl-Lösung die Prüfung. Die Prüfung bildet damit die Alkaliunempfindlichkeit des Betons entsprechend der Alkali-Richtlinie ab.

Wird kein NA-Zement eingesetzt, weisen die Betone Dehnungen über dem Orientierungswert auf. Eine Ausnahme bildet der Beton mit dem CEM I-Zement und einem Na_2O -Äquivalent von 0,81 M.-%. Dieser Beton zeigt Dehnungen im Bereich des Orientierungswerts und einen kontinuierlichen Dehnungsanstieg.

Die Bilder 9 und 10 zeigen, dass die Dehnungen von Betonen mit einer E III-S-Gesteinskörnung und 430 kg/m^3 CEM I 42,5 N (Na_2O -Äqu. = 0,62 M.-%) bzw. 370 kg/m^3 CEM I 32,5 R (Na_2O -Äqu. = 0,89 M.-%) deutlich oberhalb des Orientierungswerts lagen. Beide Betone dürfen gemäß der Alkali-Richtlinie nicht eingesetzt werden. Die E III-S-Gesteinskörnung müsste gegen eine alkaliunempfindliche Gesteinskörnung (E I, E I-S, E I-O-E I-OF) ausgetauscht werden.

Im Einzelfall kann durch den Einsatz eines NA-Zements die Prüfung bestanden werden. Generell gilt dies jedoch nicht. Der Beton mit 370 kg/m^3 NA-Zement (Na_2O -Äqu. = 0,56 M.-%) bestand die Prüfung. Der Beton mit 430 kg/m^3 NA-Zement und dem Grauwacke-Splitt (E III-S) bestand sie nicht (Bild 9).

Bei zwei flugaschehaltigen Betonen lagen die Dehnungen im Bereich bzw. über dem Orientierungswert von 0,50 mm/m (Bild 11). Die Alkali-Richtlinie legt für beide Betone keine Anforderung fest, da mit 245 kg/m^3 bzw. 280 kg/m^3 Portlandzement die Zementgehalte kleiner 300 kg/m^3 sind. Die Ergebnisse zeigen, dass Betone auf der sicheren Seite liegend bewertet werden.

4 Zusammenfassung

Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion an Betonbauwerken können vermieden werden, indem Betone mit ausreichend geringer Alkaliempfindlichkeit eingesetzt werden. Im IGF-Vorhaben 16569 N wurden Kriterien für AKR-Performance-Prüf-

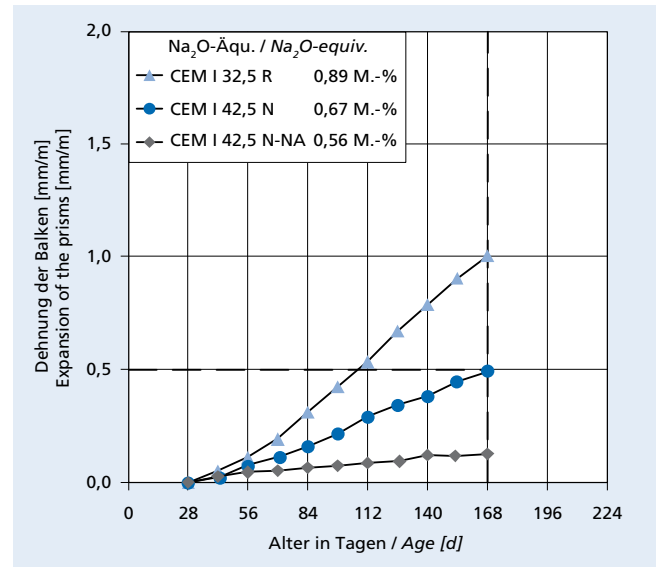


Bild 10: Dehnung von Betonen mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S und verschiedenen Zementen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung. $z = 370 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,42, LP = $4,5 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$, 31 Vol.-% Sand 0/2, 69 Vol.-% Grauwacke-Splitt E III-S 2/22

Figure 10: Expansion of concrete compositions made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class and various cements in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution. $c = 370 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.42, air voids = $4.5 \pm 0.5 \text{ vol. \%}$, 31 vol. % sand 0/2, 69 vol. % crushed greywacke E III-S 2/22

that meet the requirements of the Alkali Guidelines would pass the test.

Fig. 8 shows the expansions of concrete compositions that, according to the Alkali Guidelines, may only be used with low-alkali cements because of the cement content of 350 kg/m^3 . One of the CEM I Portland cements used had a Na_2O -equivalent of 0.62 mass % and therefore lay at the limit for low-alkali cement. The CEM III/A (laboratory) cement with a Na_2O -equivalent of 0.94 % also fulfilled the requirements for low-alkali cement. Both concrete compositions passed the test with a 3 % NaCl solution. The test therefore reproduces the lack of reactivity of the concrete composition to alkalis in line with the Alkali Guidelines.

If low-alkali cement is not used the concrete compositions exhibit expansions above the limit value. One exception is the concrete composition with CEM I cement and a Na_2O -equivalent of 0.81 mass %. This concrete composition exhibited expansions close to the limit value and a continuous increase in expansion.

Figs. 9 and 10 show that the expansions of concrete compositions with an E III-S aggregate and 430 kg/m^3 CEM I 42,5 N cement (Na_2O -equiv. = 0.62 mass %) or 370 kg/m^3 CEM I 32,5 R cement (Na_2O -equiv. = 0.89 mass %) lay significantly above the limit value. According to the Alkali Guidelines neither of the two concrete compositions could be used. The reactive aggregate (E III-S) would have to be replaced by a non-reactive aggregate (E I, E I-S, E I-O-E I-OF).

In individual cases the test can be passed by using low-alkali cement but this is not generally the case. The concrete composition with 370 kg/m^3 low-alkali cement (Na_2O -equivalent = 0.56 mass %) passed the test. The concrete with 430 kg/m^3 low-alkali cement and the reactive crushed greywacke (E III-S) did not pass it (Fig. 9).

With two concrete compositions containing fly ash the expansions lay close to or above the limit value of 0.50 mm/m (Fig. 11). The Alkali Guidelines do not stipulate any requirements for these two concretes because the cement contents of 245 kg/m^3 and 280 kg/m^3 Portland cement respectively are lower than 300 kg/m^3 .

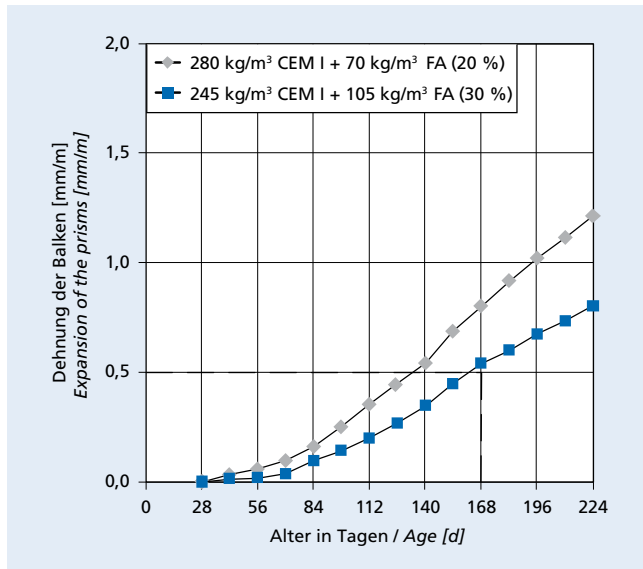


Bild 11: Dehnung von Betonen mit Grauwacke-Splitt der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S, Portlandzement und Flugasche im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung. CEM I 42,5 R, Na₂O-Äqu. = 1,19 M.-%, z + f = 350 kg/m³, w/(z + f) = 0,45 (k = 1,0), 30 Vol.-% Sand 0/2, 70 Vol.-% Grauwacke E III-S 2/16
Figure 11: Expansion of concrete compositions made with crushed greywacke of the E III-S alkali reactivity class, Portland cement and fly ash in the 60 °C concrete test with external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution. CEM I 42,5 cement, Na₂O-equiv. = 1.19 mass %, c + f = 350 kg/m³, w/(c + f) = 0.45 (k = 1.0), 30 vol. % sand 0/2, 70 vol. % greywacke E III-S 2/16

verfahren erarbeitet, um die Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA praxisgerecht bewerten zu können. Dazu wurde untersucht, inwieweit der 60 °C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen die Festlegungen zu Maßnahmen der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) in den Feuchtigkeitsklassen WF und WA abbildet. Die Festlegungen der Alkali-Richtlinie spiegeln die Erfahrungen mit Betonen in Deutschland wider, die entweder keine AKR-Schäden aufweisen oder mit denen nachweislich AKR-Schäden aufgetreten sind. Der Einfluss verschiedener Vorlagerungen und Natriumchlorid-Konzentrationen wurde untersucht.

4.1 Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF

Die Ergebnisse der 60 °C-Betonversuche (ohne Alkalizufuhr) zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF stimmen in der Regel gut mit den Festlegungen der Alkali-Richtlinie überein, wenn ein Dehnungsgrenzwert von 0,20 mm/m nach 140 Tagen bzw. 0,30 mm/m nach 52 Wochen verwendet wird. Betone mit Portlandzementen und Hochofenzement, die unter Berücksichtigung der vorbeugenden Maßnahmen der Alkali-Richtlinie hergestellt wurden, zeigten in den Laborversuchen bei Anwendung dieser Kriterien fast ausnahmslos ein regelwerkgerechtes Verhalten.

Sowohl bei hüttensandhaltigen Zementen als auch bei Verwendung von Flugasche ist eine Vorlagerung von 28 Tagen bei 20 °C zu empfehlen.

4.2 Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WA

Die Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WA wurde mit dem „60 °C-Betonversuche mit Alkalizufuhr von außen“ untersucht. Das Verfahren bildet die Festlegungen der Alkali-Richtlinie unter folgenden Bedingungen ab:

- Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige Natriumchloridlösung

These results show that the evaluation of the concrete compositions lies on the safe side.

4 Summary

Damage caused by an alkali-silica reaction in concrete structures can be avoided by using concrete compositions with a sufficiently low alkali reactivity. Criteria for ASR performance test methods were developed in IGF Project 16569 N so that practical evaluation of the alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes could be carried out. Investigations were carried out to find the extent to which the 60 °C concrete test with and without external supply of alkalis reproduces the requirements concerning measures in the Alkali Guidelines issued by the German Committee for Structural Concrete (DAfStb) for the WF and WA moisture classes. The requirements in the Alkali Guideline reflect the experience with concrete compositions in Germany that either exhibit no ASR damage or with which there has been verifiable ASR damage. The influence of different types of preliminary storage and sodium chloride concentrations was investigated.

4.1 Evaluation of the alkali reactivity of concrete compositions in the WF moisture class

As a rule, the results of the 60 °C concrete tests (without external supply of alkalis) for evaluating the alkali reactivity of concrete composition of the WF moisture class agree well with the requirements of the Alkali Guidelines when an expansion limit of 0.20 mm/m after 140 days or 0.30 mm/m after 52 weeks is applied. Concrete compositions made with Portland cements and blastfurnace cement that had been produced while taking account of the preventive measures of the Alkali Guidelines exhibited a behaviour that, in the laboratory tests, complied almost without exception with the regulations when these criteria were applied.

Preliminary storage for 28 days at 20 °C is recommended both with cements containing granulated blastfurnace cement and when fly ash is used.

4.2 Evaluation of the alkali reactivity of concrete compositions of the WA moisture class

The alkali reactivity of concrete compositions of the WA moisture class was investigated using the “60 °C concrete tests with external supply of alkalis”. This method reproduces the requirements of the Alkali Guidelines under the following conditions:

- external supply of alkalis through a 3 % sodium chloride solution
- evaluation of the result using an expansion limit of 0.50 mm/m after ten cycles (168 days) of alternating storage.

The stressing and evaluation would be out of all proportion if a 10 % sodium chloride solution were used on solutions that have proved successful in practice.

Funding note

IGF project 16569 N of the Forschungsvereinigung VDZ gGmbH was sponsored by the Federal Ministry of Economics and Energy through the AiF (Federation of Industrial Cooperative Research Associations) as part of the programme to promote Joint Industrial Research (IGF) based on a decision by the Germany Federal Parliament.

- Bewertung des Ergebnisses mit einem Dehnungsgrenzwert von 0,50 mm/m nach zehn Zyklen (168 Tagen) der Wechsellagerung

Mit einer 10 %igen Natriumchloridlösung wurden praxisbewährte Lösungen unverhältnismäßig beansprucht und bewertet.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16569 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Literatur / Literature

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb: Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Ausgabe Oktober 2013. Berlin: Beuth, 2013
- [2] DIN CEN/TR 16349:2012-11. Grundsätze für eine Spezifikation zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) in Beton. Englische Fassung CEN/TR 16349:2012
- [3] AFNOR P 18-454, Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Essai de performance. Association Française de Normalisation, Paris 2004
- [4] AFNOR FD P 18-456, Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance. Association Française de Normalisation, Paris 2004
- [5] Merkblatt SIA 2042: Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten, 2012
- [6] Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.; Müller, Ch.; Bokern, J.; Schäfer, E.: AKR-Prüfverfahren: Vergleichbarkeit und Praxis- Relevanz, Teil 1 und Teil 2. beton 56 (2006) H. 12, S. 599–604, und beton 57 (2007) H. 1+2, S. 63–71
- [7] Borchers, I.; Müller, Ch.: Assessment of the alkali-reactivity potential of specific concrete mixtures to mitigate damaging ASR in concrete structures. Proceeding of the Workshop on Performance-based Specifications for Concrete, MFPA Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen, Leipzig 2011, S. 98–106
- [8] Bonzel, J.; Dahms, J.: Alkali-reaktion im Beton. beton 23 (1973) H. 11, S. 495–500 und H. 12. S. 547–554; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 153–189
- [9] Leemann, A.; Merz, Ch.: An attempt to validate the ultra-accelerated micro-bar and the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures. Cement and Concrete Research 49 (2013) No. 7, p. 29–37
- [10] Leemann, A.; Merz, Ch.: Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung. ASTRA-Bericht. AGB 2005/023 und AGB 2006/003, Bern 2012

Maria Teresa Alonso und Patrick Schäffel, Düsseldorf

Das Wasserabsondern von Beton für Industrieböden – Laborergebnisse und Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse

Water secretion from concrete for industrial floors – laboratory results and their applicability to practical conditions

Übersicht

Planer, Betonhersteller und ausführende Unternehmen von Industriebetonböden berichten über Schadensfälle, die auf das Wasserabsondern des Betons zurückgeführt werden. Wasser, das sich auf der Oberfläche von flächigen Bauteilen sammelt, kann sich aber auch positiv als eine Nachbehandlungsmaßnahme auswirken. Die weitere Bearbeitung der Betonoberfläche kann dadurch ggf. beeinträchtigt werden. Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Wasserabsonderns mit typischen Betonzusammensetzungen für Industriebetonböden wurden durchgeführt und die Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse wurde überprüft. Das Wasserabsondern ist abhängig von der Zementart, vom Wassergehalt, von der Sieblinie und von Zusatzmittelart und -dosierung. Die Ergebnisse ermöglichen die Abschätzung betontechnologischer Einflüsse auf das Wasserabsondern unter Berücksichtigung baupraktischer Gesichtspunkte.

1 Einleitung

Frischbeton kann im Zuge seines Einbaus und seiner Verdichtung in unterschiedlichem Maße Wasser absondern, das sich an der Oberfläche eines Betonbauteils ansammelt. Dieser Vorgang wird gemeinhin auch als „Bluten“ bezeichnet. Die Ausgangsstoffe des Frischbetons liegen während des Mischvorgangs und unmittelbar nach dem Einbau des Betons als Suspension vor. Bei der Sedimentation der gröberen Feststoffbestandteile kann das aufsteigende Wasser feine Partikel an die Oberfläche transportieren und ein Teil dieses Wassers kann sich unter groben Gesteinskörnungen bzw. an Unebenheiten der Bauteiloberfläche sammeln. Das kann zur Beeinträchtigung des Verbunds in der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein sowie zur Bildung von Hohlräumen, insbesondere im oberflächennahen Bereich führen. Durch das Wasserabsondern kann sich damit auch eine veränderliche Betonzusammensetzung im Querschnitt einstellen, die im ungünstigsten Fall zu unerwünschten Betoneigenschaften führt. Durch das Wasserabsondern hervorgerufene Schwankungen im Luftgehalt können den Frost-Tausalz-Widerstand beeinträchtigen.

Wasser, das sich bei flächigen Bauteilen auf der Oberfläche sammelt und dort zunächst stehen bleibt, kann sich in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (Verdunstungsrate) aber auch positiv als Nachbehandlungsmaßnahme auswirken und die Oberfläche vor einer schnellen Austrocknung des Betons schützen. Die weitere Bearbeitung der Oberfläche von Betonböden kann durch das Wasserabsondern jedoch beeinträchtigt werden, da ggf. das Entfernen des Blutwassers notwendig ist, die Liegezeit fehlerhaft bestimmt wird und beim Glätten eine Walkbeanspruchung in dieser Zone verursacht werden kann. Darüber hinaus kann es durch das abgesonderte Wasser zu einer Verringerung der Festigkeit an der Betonoberfläche kommen, bei einer Hartstoffeinstreuung ein mangelnder Verbund zwischen Hartstoff und

Abstract

There have been reports from designers, concrete producers and contractors concerning cases of damage to industrial concrete floors that are attributable to secretion of water from the concrete. Water that concentrates on the surface of flat structural elements can also have a positive effect on the curing but may possibly be detrimental to further treatment of the concrete surface. Laboratory investigations to determine the water secretion with typical concrete compositions for industrial concrete floors were carried out and their applicability to practical conditions was checked. Water secretion is dependent on the water content, the grading curve and the type and addition level of the admixtures. The results make it possible to assess the concrete technology factors affecting the water secretion while taking the practical construction aspects into account.

1 Introduction

When fresh concrete is being placed and compacted it can secrete varying quantities of water that collect on the surface of a concrete structural element. This process is commonly known as “bleeding”. During the mixing process and immediately after the concrete has been placed the components of the fresh concrete are present as a suspension. During sedimentation of the coarser solid constituent the rising water can transport fine particles to the surface and some of this water can collect under coarse particles of aggregate and in irregularities on the surface of the structural element. This can have an adverse effect on the bond in the contact zone between aggregate and hardened cement paste and lead to the formation of voids, especially in areas close to the surface. This means that water secretion can also cause a varying concrete composition over the cross-section that, in an unfavourable case, can lead to undesirable concrete properties. Fluctuations in air content caused by water secretion can adversely affect the resistance to freeze-thaw with de-icing salt.

Water that collects on the surface of flat structural elements and initially remains there can, depending on the ambient conditions (rate of evaporation), also have a positive effect on the curing and prevent the surface of the concrete from drying out rapidly. However, further treatment of the surface of concrete floors can be adversely affected by water secretion as it may be necessary to remove the bleed water, the life may be incorrectly determined and a flexing stress can be generated in this zone during levelling. The secreted water can also cause a reduction in strength at the concrete surface, there may be a defective bond between granolithic material and mortar when granolithic material is spread and a change in volume can occur that may lead to a reduction of the concrete cover over the steel and increase the risk of premature cracking [1-7].

The varied dependence of water secretion on the concrete composition and factors such as ambient and site conditions, construction sequence and structural element geometry necessitates

Mörtel entstehen und eine Volumenänderung auftreten, die ggf. zur Abnahme der Betondeckung des Stahls führt bzw. das Risiko der Frührissbildung erhöht [1–7].

Die vielseitige Abhängigkeit des Wasserabsonderns von der Betonzusammensetzung und Faktoren wie Umgebungs- bzw. Baustellenbedingungen, Bauablauf und Bauteilgeometrie erfordern gezielte Erstprüfungen. Zur Erfassung des Wasserabsonderns wurde für den Hochbau das „Rohrverfahren“ [8] entwickelt. In DIN EN 480-4 wird ein Verfahren zur Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten) im Labor zur Prüfung von Zusatzmitteln in Beton, Mörtel und Einpressmörtel beschrieben. Seit einigen Jahren wird aufgrund seiner Einfachheit zunehmend das Eimer-Verfahren nach [9] eingesetzt. Anhaltswerte für Bewertungskriterien werden derzeit diskutiert [6, 7, 8, 9, 12, 13, 18].

In welchem Maße das Wasserabsondern einer Betonzusammensetzung durch eine geeignete Kornpackung, die Fließmitteldosierung und eine planmäßige Wechselwirkung zwischen Zement und Fließmittel beeinflusst wird, kann derzeit nicht sicher beantwortet werden [1, 10]. Ergebnisse aus Versuchen an Zementleim und Mörtel können nicht direkt auf den Beton übertragen werden. Die Menge an abgesondertem Wasser, die bei Einbau und Bearbeitung von Betonböden tolerierbar und sogar erwünscht ist, ist nicht eindeutig definiert. Einige der vorhandenen Prüfmethode sind für die Baustelle wenig geeignet und ihre Ergebnisse in der Regel untereinander nicht vergleichbar. Derzeit werden noch Erfahrungen mit den jeweiligen Prüfverfahren gesammelt, sodass i.d.R. noch nicht von festen Grenzwerten, sondern von Anhaltswerten zu sprechen ist [8, 9].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass zurzeit wissenschaftlich begründete und quantifizierte Angaben fehlen, die dem Planer, dem Betonhersteller und dem ausführenden Unternehmen als Hilfe bei der Auswahl der Betonzusammensetzung für Betonböden dienen können.

Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens Nr. 16328 N [11] wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Untersuchungen zur Optimierung der Betonzusammensetzung zur Verringerung der Sedimentations- und Entmischungsneigung von Industriebetonböden durchgeführt. Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung von Empfehlungen zur zielsicheren Herstellung von Betonböden. Hierzu wurden unter anderem Laboruntersuchungen zum Wasserabsondern des Betons durchgeführt, bei deren Durchführung auch die Frage der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Praxisverhältnisse beleuchtet wurde. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse zum Wasserabsondern erläutert. Andere Ergebnisse dieses Vorhabens sind aus [11, 20] zu entnehmen.

2 Vorgehensweise

Die Laboruntersuchungen sollten Hinweise zur Optimierung einer Betonzusammensetzung im Hinblick auf ein für Industriebetonböden angemessenes Wasserabsondern und eine geringe Sedimentationsneigung des Betons ermöglichen. Ziel der Laboruntersuchungen war es zunächst, die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf das Wasserabsondern quantitativ zu bestimmen, um eine gezielte Steuerung des Wasserabsonderns für die Praxis zu erzielen. Folgende Parameter wurden untersucht: Zementart und Zementgehalt, Wassergehalt bzw. Wasserzementwert, Sieblinie der Gesteinskörnung und Mehlkorngesamt sowie die Verwendung von verflüssigenden Betonzusatzmitteln. Darüber hinaus wurden Einflüsse des Prüfverfahrens selbst und spezifische Einflüsse der betrachteten Bauweise einbezogen.

Das Wasserabsondern wurde mit dem Eimerverfahren nach [9] ermittelt. Die Ergebnisse wurden außerdem mit dem Prüfverfahren nach [8] und in Anlehnung an DIN EN 480-4 verglichen. Darüber hinaus wurden Untersuchungen mit einer Filterpresse in Anlehnung an das ÖVBB-Merkblatt „Weiche Betone“ [14] durchgeführt.

3 Untersuchungen

3.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

Insgesamt wurden 61 Betonzusammensetzungen untersucht. Hierfür wurden Betone mit zehn verschiedenen handelsüblichen

carefully directed initial testing. The “pipe method” [8] was developed for building work to measure the water secretion. A method for determining the water secretion (bleeding) from concrete in the laboratory to test admixtures in concrete, mortar and grouting mortar is described in DIN EN 480-4. The bucket method specified in [9] has been used increasingly for some years because of its simplicity. Reference values for evaluation criteria are currently under discussion [6, 7, 8, 9, 12, 13, 18].

The extent to which water secretion from a concrete composition is affected by suitable particle packing, the addition level of superplasticizer, and systematic interaction between cement and superplasticizer cannot yet be stated reliably [1, 10]. Results of trials with cement paste and mortar cannot be applied directly to concrete. The quantity of secreted water that can be tolerated, or is even desirable, when placing and processing concrete floors is not clearly defined. Some of the available test methods are not very suitable for building sites and, as a rule, their results are not comparable with one another. Experience with the respective test methods is still being gathered so that, as a rule, it is only possible at the moment to speak of reference values rather than fixed limits [8, 9].

The situation can be summarized by stating that there is currently a lack of scientifically based and quantified information that designers, concrete producers and contractors can use to help them choose concrete compositions for concrete floors.

Trials have been carried out at the Research Institute of the Cement Industry as part of IGF Research Project No. 16328 N [11] to optimize the concrete composition in order to reduce the tendency for sedimentation and segregation in industrial concrete floors. The aim of the research project was to work out recommendations for dependable production of concrete floors. Among other things, laboratory investigations were carried out into the secretion of water from concrete during which the question of the applicability of the results to practical conditions was also examined. This article explains the results relating to water secretion. Other results of this project can be found in [11, 20].

2 Procedure

The laboratory investigations were intended to provide information about optimizing a concrete composition with respect to water secretion that is appropriate for industrial concrete floors with a low tendency to sedimentation. The aim of the laboratory investigations was initially to determine the quantitative influence of the concrete composition on water secretion in order to achieve selective control of the water secretion for practical purposes. The following parameters were examined: cement type and cement content, water content or water/cement ratio, grading curve of the aggregates and the fines content as well as the use of plasticizing concrete admixtures. The effects of the test procedure itself and specific effects of the mode of construction under consideration were also included.

The water secretion was determined using the bucket method specified in [9]. The results were also compared with those obtained by the test method described in [8] and by following the procedure in DIN EN 480-4. Investigations were also carried out with a filter press based on the ÖVBB data sheet “Soft concretes” [14].

3 Investigations

3.1 Constituents and concrete composition

A total of 61 concrete compositions were examined. Concretes were produced using ten different commercially available cements, three admixtures, five water/cement ratios and 17 grading curves. The concrete compositions investigated are shown in tabular form in Table 1.

The following cement types and cement strength classes were used: CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, CEM II/B-S 42,5 N, CEM III/A 42,5 N. The cement properties are summarized in Table 2. The cement content of the concretes varied between 300 kg/m³ and 360 kg/m³. The concretes were produced with water/cement ratios between 0.50 and 0.60. The mixing water was

Zementen, drei Zusatzmitteln, fünf Wassermengewerten und 17 Sieblinien hergestellt. Tafel 1 enthält eine tabellarische Übersicht der untersuchten Betonzusammensetzungen.

Folgende Zementarten bzw. Zementfestigkeitsklassen wurden verwendet: CEM I 32,5 R, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, CEM II/B-S 42,5 N, CEM III/A 42,5 N. Die Zementeigenschaften sind in Tafel 2 zusammengefasst. Der Zementgehalt der Betone variierte zwischen 300 kg/m³ und 360 kg/m³. Die Betone wurden mit Wassermengewerten zwischen 0,50 und 0,60 hergestellt. Das Zugabewasser wurde dem Düsseldorfer Leitungsnetz entnommen. Es wurden die Sieblinien A8/B8, A16/B16 und A32/B32 mit und ohne Zugabe der Korngruppe 0/0,125 untersucht. Als Gesteinskörnung wurden Rheinsand und Rheinkies verwendet. Zur Einstellung der Konsistenz wurden ein handelsübliches Fließmittel auf der Basis von Melamin- und Naphthalinsulfat (MNS) und zwei Polycarboxylatether (PCE) verwendet. Das MNS fin-

taken from the Düsseldorf mains system. The A8/B8, A16/B16 and A32/B32 grading curves, with and without the addition of the 0/0,125 particle size fraction, were investigated. Rhine sand and Rhine gravel were used as aggregates. A commercially available superplasticizer based on melamine and naphthalene sulfonate (MNS) and two polycarboxylate ethers (PCEs) were used to adjust the consistency. The MNS is used in the prefabricated component industry and on building sites. The “prefabricated component industry” type of PCE superplasticizer is used in the prefabricated component industry. A “consistency retainer” type of PCE superplasticizer, which is used in ready-mixed concrete to control the consistency for long transport and workability times, was also used in one series of investigations.

Tafel 1: Untersuchte Betonzusammensetzungen
Table 1: Concrete compositions examined

Zementart Cement type	Werk Plant	Zementgehalt Cement content [kg/m³]	w/z w/c	Sieblinie Grading curve	Mehlkorngehalt Ultrafines content [kg/m³]	Zusatzmittel Admixture [M.-%/mass %]	Betonbezeichnung Concrete designation	
CEM I 32,5 R	G	300	0,60	A16/B16	335	Ohne/none	B0	
		320	0,50		324	Ohne/none	B1	
			0,60			Ohne/none	B2	
	J	340	0,50		359	Ohne/none	B3	
	G				324	Ohne/none	B5	
	A	340	0,50		344	Ohne/none	B6	
					344	Ohne/none	B7	
						1,6 MNS	BM1	
					0,6 PCE-A	BM3		
	B	340	0,50		394	1,6 MNS	BM2	
						344	1,4 MNS	BM4
							0,7 PCE-A	BM5
	1,4 MNS	BM6						
	A	340	0,60		344		Ohne/none	B8
	B					Ohne/none	B9	
	J					Ohne/none	B10	
	G	360	0,50	A8/B8		365	Ohne/none	B11
				A16/B16	413	Ohne/none	B12	
					364	Ohne/none	B13	
					399	Ohne/none	B14	
				A32/B32	364	Ohne/none	B15	
					397	Ohne/none	B16	
CEM I 42,5 R				J	320	0,60	324	Ohne/none
CEM I 52,5 R	J	340	Ohne/none	B18				
			344	Ohne/none	B19			
CEM II/A-LL 32,5 R	C	340	0,50	A16/B16	344	1,4 MNS	BM7	
						0,6 PCE-A	BM8-D1	
						0,7 PCE-A	BM8-D2	
			0,8 PCE-A			BM8-D3		
			1,4 MNS			BM9		
			1,4 MNS			BM10		
			Ohne/none			B21		

Fortsetzung Tafel 1 auf der nächsten Seite/Continuation of table 1 on the next page

Zementart Cement type	Werk Plant	Zementgehalt Cement content [kg/m³]	w/z w/c	Sieblinie Grading curve	Mehlkorngehalt Ultrafines content [kg/m³]	Zusatzmittel Admixture [M.-%/mass %]	Betonbezeichnung Concrete designation
CEM II/B-S 42,5 N	D	320	0,60		324	Ohne/none	B22
		340	A16/B16*)		359	Ohne/none	B23
					344	Ohne/none	B24
				370	2,4 MNS	BM-11-S3	
				370	2,4 MNS	BM-11-S4-D1	
					2,1 MNS	BM-11-S4-D2	
				380	2,4 MNS	BM-11-S5	
				375	2,4 MNS	BM-11-S6	
				370	2,3 MNS	BM-11-S7	
				360	1,8 MNS	BM-11-S8	
				350	2,3 MNS	BM-11-S9	
					1,3 MNS	BM-11-S9-W	
					1,6 MNS	BM-11-S10	
					1,9 MNS	BM-11-S11	
					1,8 MNS	BM-11-S12	
					1,7 MNS	BM-11-SW	
			1,0 PCE-A		BM12-SW-A		
			1,4 PCE-B	BM12-SW-B			
			0,54	A16/B16	394	2,2 MNS	BM13
		1,1 PCE-A			BM14		
		0,60	344	Ohne/none	B25		
		CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	E	340	0,50	A16/B16	344
0,60	1,3 PCE-A				BM16		
	344				Ohne/none		B27
CEM III/A 42,5 N	F	340	0,50		344	Ohne/none	B29
			0,53			1,2 MNS	BM17
						0,6 PCE-A	BM18
						1,2 MNS	BM19
			0,60			Ohne/none	B30
*) Sieblinien nach Veränderungen innerhalb der Sieblinien A16/B16, s. Bild 9							
*) Grading curves after alteration of the grading curve A16/B16, s. Fig. 9							

*) Sieblinien nach Veränderungen innerhalb der Sieblinien A16/B16, s. Bild 9

*) Grading curves after alteration of the grading curve A16/B16, s. Fig. 9

Tafel 2: Zementeigenschaften

Table 2: Cement properties

Zemente/Cements		Zementeigenschaften/Cement properties							
Zementart Cement type	Werk Plant	Dichte/ Density [g/cm³]	Mahlfeinheit nach Blaine Fineness acc. to Blaine [cm²/g]	Wasser- anspruch Water demand [M.-%/mass %]	Erstarrungsbeginn Setting time [min]		Druckfestigkeit Compressive strength [N/mm²]		
					Beginn Start	Ende End	2 d	7 d	28 d
CEM I 32,5 R	A	3,06	2540	25,5	205	240	16,7	33,5	46,8
	B	3,06	3300	24,0	180	225	20,3	37,0	46,4
	G	3,06	2930	25,5	180	225	20,8	39,9	48,3
	J	3,10	3230	27,0	180	225	21,0	35,3	46,8
CEM I 42,5 R	J	3,09	3330	28,0	170	210	25,6	46,5	57,7
CEM I 52,5 R	I	3,06	5490	31,0	130	165	44,6	57,5	65,3
CEM II/A-LL 32,5 R	C	3,01	4230	26,0	130	165	24,7	42,0	48,5
CEM II/B-S 42,5 N	D	3,02	4540	31,0	190	240	21,5	37,1	54,6
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	E	3,01	4280	30,5	200	240	21,3	32,1	43,1
CEM III/A 42,5 N	F	2,96	4390	29,5	205	255	19,0	36,0	57,9

det in der Fertigteilindustrie und auf Baustellen Anwendung. Das PCE-Fließmittel vom Typ „Fertigteilindustrie“ wird in der Fertigteilindustrie verwendet. In einer Reihe von Untersuchungen wurde ein PCE-Fließmittel vom Typ „Konsistenzhalter“ eingesetzt, das im Transportbeton zur Konsistenzsteuerung für lange Transport- und Verarbeitungszeiten verwendet wird.

3.2 Herstellung und Lagerung der Prüfkörper im Labor

Die Betonherstellung im Labor erfolgte in einem Tellermischer. Die trockene Gesteinskörnung wurde mit 5 kg/m^3 Zugabewasser befeuchtet und die befeuchtete Gesteinskörnung und der Zement wurden zunächst 30 s gemischt. Nach vollständiger Wasserzugabe wurde der Beton 2 min weiter gemischt. Bei den Betonen mit dem Fließmittel MNS erfolgte eine einmalige Fließmittelzugabe rd. 35 min nach Mischende. Während dieser rd. 35 min blieb der Beton mit Folie abgedeckt im Tellermischer. Die 35 min entsprechen in vielen Fällen der Zeit zwischen der Herstellung im Transportbetonwerk und der Ankunft auf der Baustelle. Das PCE wurde direkt mit dem Zugabewasser zugegeben und der Beton blieb wiederum 35 min mit Folie abgedeckt im Tellermischer. Kurz vor der Bestimmung der Eigenschaften wurde der Beton erneut kurz gemischt.

Die Betone lagerten nach der Herstellung bis zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften in der Betonhalle bei Temperaturen zwischen 19°C und 23°C .

3.3 Prüfverfahren

Die Konsistenz des Frischbetons wurde mit dem Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 bestimmt. Die Frischbetondichte bzw. der Luftgehalt des Betons wurde gemäß DIN EN 12350-6 bzw. DIN EN 12350-7 zehn Minuten nach Ende der Herstellung ermittelt.

Das Wasserabsondern wurde mit dem Eimerverfahren nach [9] bestimmt. Die Prüfgefäße wurden zehn Minuten nach Mischende in zwei Lagen eingefüllt und auf dem Rütteltisch verdichtet. Die erste Messung erfolgte 60 min nach Mischende und wurde in Zeitabständen von 60 min wiederholt.

Versuche zur Bestimmung der ausgepressten Filtratwassermenge in Anlehnung an [14] wurden durchgeführt. Hierfür wurde der Frischbeton zehn Minuten nach Mischende in den Stahlbehälter einer Filterpresse eingefüllt, mit einem Verdichtungsholz verdichtet und mittels Stahllineal am oberen Rand abgezogen. Nach Verschließen des Behälters wurde auf den Frischbeton ein pneumatischer Druck von 3 bar aufgebracht. Unter dem Luftdruck gibt der Frischbeton mit der Zeit Wasser ab, das im Messzylinder in

3.2 Production and storage of the test specimens in the laboratory

The concrete was produced in the laboratory in a pan mixer. The dry aggregate was wetted with 5 kg/m^3 mixing water and the moistened aggregate and the cement were then mixed for 30 s. After addition of all the water the concrete was then mixed for a further 2 min. For the concretes containing MNS superplasticizer there was a single addition of superplasticizer about 35 min after the end of mixing. During these 35 min the concrete remained in the pan mixer covered with film. In many cases the 35 min corresponds to the time between production in a ready-mixed concrete plant and arrival at the building site. The PCE was added directly with the mixing water, and once again the concrete remained for 35 minutes in the pan mixer covered with film. The concrete was mixed again for a short time just before determination of the properties.

After production and until determination of the fresh concrete properties the concretes were stored in the concrete production building at temperatures between 19°C and 23°C .

3.3 Test methods

The consistency of the concrete was determined using the flow-table spread as defined in DIN EN 12350-5. The fresh concrete density and the air content of the concrete were determined in accordance with DIN EN 12350-6 and DIN EN 12350-7 respectively, ten minutes after the end of production.

The water secretion was determined by the bucket method specified in [9]. Ten minutes after the end of mixing the test vessel was filled in two layers and compacted on the vibrating table. The first measurement was made 60 min after the end of mixing and was repeated at intervals of 60 min.

Tests were carried out for determining the quantity of filtrate water expressed using the procedure described in [14]. Ten minutes after the end of mixing the fresh concrete was placed in the steel container of a filter press, compacted with a wooden rammer and struck off at the upper edge with a steel rule. After the container had been closed a pneumatic pressure of 3 bar was applied to the fresh concrete. Under the air pressure the fresh concrete released water over a period of time. The water was collected in the measuring cylinder at varying time intervals. During the investigations some tests were carried out with a reduced test pressure of 1 bar instead of 3 bar (see Section 4.4.2).

4 Test results

4.1 Fresh concrete properties

The fresh concrete density of all the concretes investigated lay between 2310 kg/m^3 and 2450 kg/m^3 . In all cases the air content was about 1 vol. %. The flow-table spreads of the concretes without superplasticizer varied between 370 mm and 620 mm. With constant concrete composition and without any superplasticizer the flow-table spread tended to decrease when cements of greater fineness were used (Fig. 1 and Table 2).

The target consistency for the concretes containing superplasticizer was $(540 \pm 20) \text{ mm}$ after 35 min.

During the determination of the quantity of bleed water all the concretes examined initially exhibited an almost linear increase in the quantity of bleed water that reached a maximum value after about 3 h to 6 h. The tests were continued beyond these values and a fall was recorded after the maximum value. Fig. 2 shows an example of the behaviour of the measured water secretion of concretes with various compositions. The water secretion from concretes without superplasticizers increased with rising flow-table spread (Fig. 3).

4.2 Influence of concrete composition on water secretion

4.2.1 Influence of the type of cement and the cement content on the water secretion

As a rule, the concretes made with CEM II and CEM III/A cement had less water secretion for the same concrete composition than the concrete made with CEM I cement (Fig. 4).

With a constant concrete composition and without extra addition of inert fines (such as quartz meal), the water secretion tended

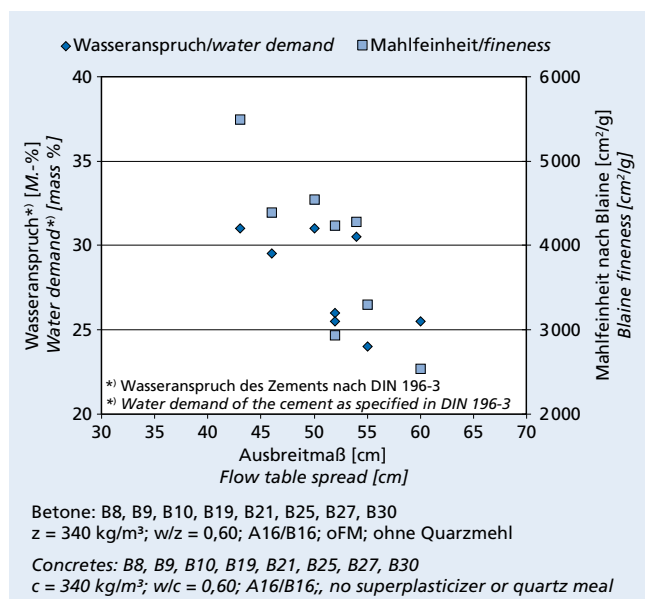


Bild 1: Ausbreitmaß von Betonen ohne Zusatzmittel

Figure 1: Flow table spread of concretes without admixtures

unterschiedlichen Zeitabständen erfasst wurde. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Versuche z.T. mit Reduzierung des Prüfdrucks von 3 bar auf 1 bar durchgeführt (s. Abs. 4.4.2).

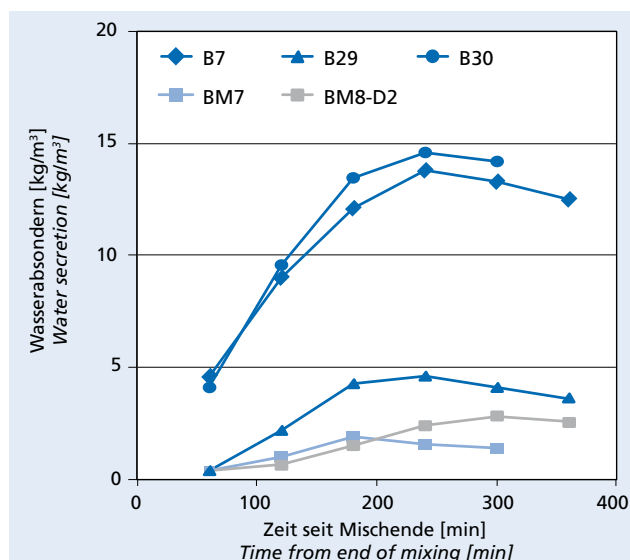
4 Versuchsergebnisse

4.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetonrohddichte aller untersuchten Betone lag zwischen 2310 kg/m³ und 2450 kg/m³. Der Luftgehalt betrug jeweils rd. 1 Vol.-%. Das Ausbreitmaß der Betone ohne Fließmittel variierte zwischen 370 mm und 620 mm. Bei konstanter Betonzusammensetzung und ohne Fließmittel nahm das Ausbreitmaß der Betone tendenziell bei Verwendung von Zementen mit höherer Mahlfineinheit ab (Bild 1 und Tafel 2).

Die Zielkonsistenz der Betone mit Fließmittel betrug (540 ± 20) mm nach 35 min.

Bei der Bestimmung der Blutwassermenge zeigten alle untersuchten Betone zunächst eine annähernd lineare Zunahme der Blutwassermenge, die nach ca. 3 h bis sechs h einen maximalen Wert erreichte. Die Versuche wurden über diesen Wert hinaus fortgesetzt und somit wurde nach dem maximalen Wert ein Absinken erfasst. Bild 2 zeigt beispielhaft den Verlauf des gemessenen Wasserabsonderns von Betonen verschiedener Betonzusammensetzungen. Mit steigendem Ausbreitmaß nahm das Wasserabsondern von Betonen ohne Zusatzmittel zu (Bild 3).



B7	CEM I 32,5 R	w/z = 0,50 w/c = 0,50	ohne Zusatzmittel no admixture
B29	CEM III/A 42,5 N	w/z = 0,50 w/c = 0,50	ohne Zusatzmittel no admixture
B30		w/z = 0,60 w/c = 0,60	ohne Zusatzmittel no admixture
BM7	CEM II/A-LL 32,5 R	w/z = 0,50 w/c = 0,50	1,4 M.-% MNS 1.4 mass % MNS
BM8-D2		w/z = 0,50 w/c = 0,50	0,7 M.-% PCE-A 0.70 mass % PCE-A

z = 340 kg/m³; Sieblinie A16/B16;
Mehlkorngehalt 344 kg/m³
c = 340 kg/m³; grading curve A 16/B 16,
ultrafines content 344 kg/m³

Bild 2: Verlauf des Wasserabsonderns verschiedener Betone
Figure 2: Progress of water seepage from different concretes

to depend on the specific surface and the water demand of the cement used (Fig. 5 and Table 2). As expected (for example [15]), the concretes made with coarser cements secreted more water than the concretes made with the more finely ground cements. Cements with higher standard compressive strengths and comparable proportions of the main cement constituents exhibited less water secretion in the concrete.

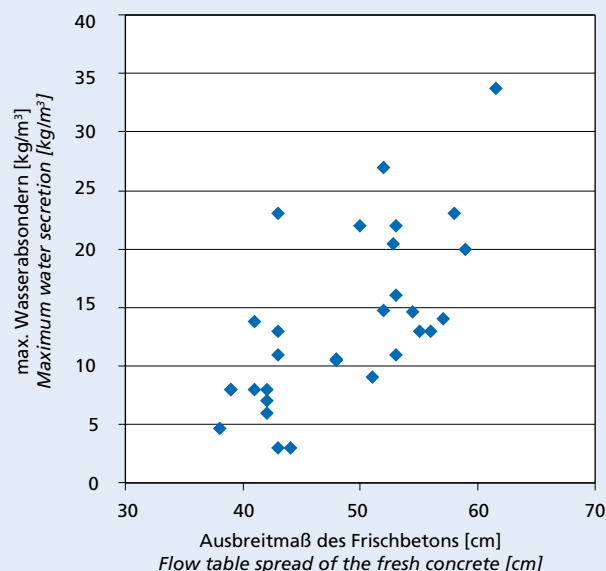
The water secretion fell with higher cement content and constant water content in the concrete, i.e. lower water/cement ratio and higher paste volume (e.g. concretes B0 and B13, Fig. 6). The measured quantity of secreted water also increased with constant water/cement ratio and increasing cement paste content or cement content (e.g. concretes B1, B6 and B13 in Fig. 6).

4.2.2 Influence of the water content on water secretion

Water secretion is dependent on the water content, so for the same cement content an increase in water secretion was found with increasing water/cement ratio (see, for example, concretes B29 and B30 in Fig. 2). In the bucket method a maximum water secretion of between about 11 kg/m³ and 35 kg/m³, depending on the type of cement, was measured in concrete with a water/cement ratio of 0.60 and a cement content of 340 kg/m³ without superplasticizer (Fig. 4). At a water content of 170 kg/m³ and a water/cement ratio of 0.50 without superplasticizer the water secretion was reduced to values between 5 kg/m³ and 15 kg/m³.

4.2.3 Influence of concrete admixtures on water secretion

As already shown in [16], the interaction between cement and concrete admixture can, alongside other concrete technology parameters, have a substantial influence on the tendency of concrete to secrete water and to segregate. In concretes containing plasticizing



z zwischen 300 und 360 kg/m³;
c between 300 and 360 kg/m³

w/z zwischen 0,50 und 0,60;
w/c between 0.50 and 0.60

A8/B8; A16/B16; A32/B32;
verschiedene Zemente ohne und mit inerten Feststoffen
A8/B8; A16/B16; A32/B32;
Various cements with and without inert solids

Bild 3: Ausbreitmaß und Wasserabsondern von Betonen ohne Zusatzmittel
Figure 3: Flow table spread and water seepage of concretes without admixtures

4.2 Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Wasserabsondern

4.2.1 Einfluss der Zementart und des Zementgehalts auf das Wasserabsondern

In der Regel zeigten die Betone mit CEM II- und CEM III/A-Zementen bei sonst gleicher Betonzusammensetzung ein geringeres Wasserabsondern als der Beton mit dem CEM I-Zement (Bild 4).

Bei konstanter Betonzusammensetzung und ohne zusätzliche Zugabe von inerten Feinstoffen, wie z.B. Quarzmehl, hing das Wasserabsondern tendenziell von der spezifischen Oberfläche bzw. dem Wasseranspruch des verwendeten Zements ab (Bild 5 und Tafel 2). Wie erwartet (vgl. z.B. [15]) sonderten die Betone mit gröberen Zementen mehr Wasser ab, als die Betone mit feiner gemahlten Zementen. Zemente mit höherer Normdruckfestigkeit bei vergleichbaren Anteilen der Zementhauptbestandteile zeigten im Beton ein geringeres Wasserabsondern.

Bei höherem Zementgehalt und bei konstantem Wassergehalt im Beton, d.h. geringerem Wasserzementwert und höherem Leimvolumen, verringerte sich das Wasserabsondern (z.B. Betone B0 und B13, Bild 6). Mit konstantem Wasserzementwert und zunehmendem Zementleimgehalt bzw. Zementgehalt erhöhte sich auch die ermittelte Menge des abgesonderten Wassers (z.B. Betone B1, B6 und B13 in Bild 6).

4.2.2 Einfluss des Wassergehalts auf das Wasserabsondern

Das Wasserabsondern ist vom Wassergehalt abhängig und somit konnte bei jeweils gleichem Zementgehalt eine Zunahme des Blutens mit steigendem Wasserzementwert festgestellt werden (s. z.B. Bild 2, Beton B29 und B30). Im Eimerverfahren wurden an Beton mit einem Wasserzementwert 0,60 bei einem Zementgehalt von 340 kg/m³ ohne Zusatzmittel in Abhängigkeit von der Zementart ein maximales Wasserabsondern zwischen ca. 11 kg/m³ und 35 kg/m³ gemessen (Bild 4). Bei einem Wassergehalt von 170 kg/m³ und einem Wasserzementwert von 0,50 ohne Fließmittel verringerte sich das Wasserabsondern auf Werte zwischen 5 kg/m³ und 15 kg/m³.

4.2.3 Einfluss von Betonzusatzmitteln auf das Wasserabsondern

Wie bereits in [16] dargestellt, kann die Wechselwirkung zwischen Zement und Betonzusatzmittel neben anderen betontechnologischen Parametern maßgeblich die Neigung des Betons zum Wasserabsondern bzw. Entmischen beeinflussen. Bei Beton mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Zusatzmittelart und der Dosierung auf die abgesonderte Wassermenge bei vergleichbarem Ausbreitmaß.

Die Ergebnisse zeigten, dass einerseits das Wasserabsondern nahezu unabhängig vom verwendeten Zusatzmittel war (Bild 7, Betone mit CEM III/A), sich andererseits die Menge des abgesonderten Wassers bei den Betonen mit Portlandzement CEM I und Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL (Bild 7) bei Verwendung des PCE-A-Fließmittels im Vergleich zum Melamin- und Naphthalinsulfat verdoppelte. Ebenfalls doppelte Mengen an abgesondertem Wasser wurden bei Verwendung vom Zusatzmittel MNS und unterschiedlichen Zementen erfasst. Der Beton mit CEM III/A 42,5 N zeigte mit rd. 5 kg/m³ die doppelte Menge an abgesondertem Wasser wie der Beton mit CEM II/A-LL 32,5 R bei vergleichbarer Konsistenz (Bild 7). Aus dem Vergleich dieser Ergebnisse mit den abgesonderten Wassermengen in Abhängigkeit vom verwendeten Zement ohne Zusatzmittel muss in Abhängigkeit von der Zement-/Zusatzmittel-Kombination von einem z.T. erheblichen Einfluss auf das Wasserabsondern ausgegangen werden. Die Betone mit CEM II/A-LL 32,5 R und CEM III/A 42,5 N ohne Zusatzmittel bei einem Wasserzementwert von 0,60 zeigten nahezu die gleiche Menge an abgesondertem Wasser von rd. 15 kg/m³ (Bild 4).

Ebenfalls zeigten die Ergebnisse, dass die Zusatzmitteldosierung einen z.T. erheblichen Einfluss auf das Wasserabsondern haben kann. Der Einfluss der Dosierung des Zusatzmittels wurde mit dem PCE-A bei Betonen mit CEM II/A-LL 32,5 R und w/z = 0,50 untersucht. Bild 8 zeigt, dass das Wasserabsondern

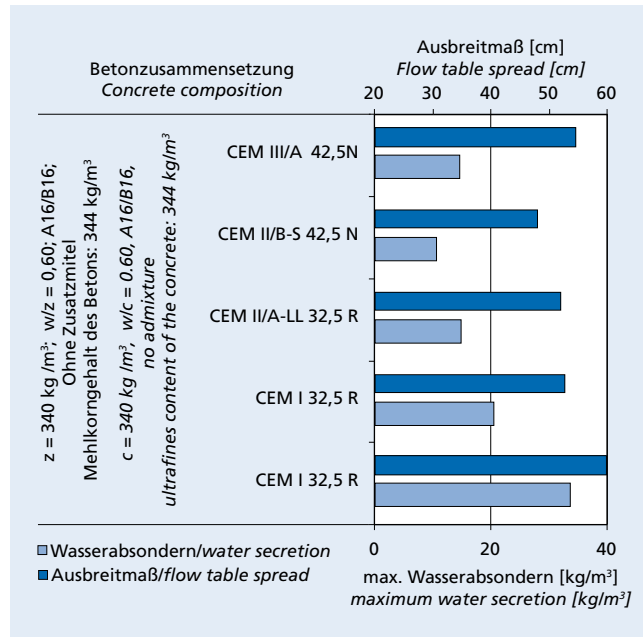


Bild 4: Ausbreitmaß und Wasserabsondern von Betonen ohne Zusatzmittel

Figure 4: Flow table spread and water secretion of concretes without admixtures

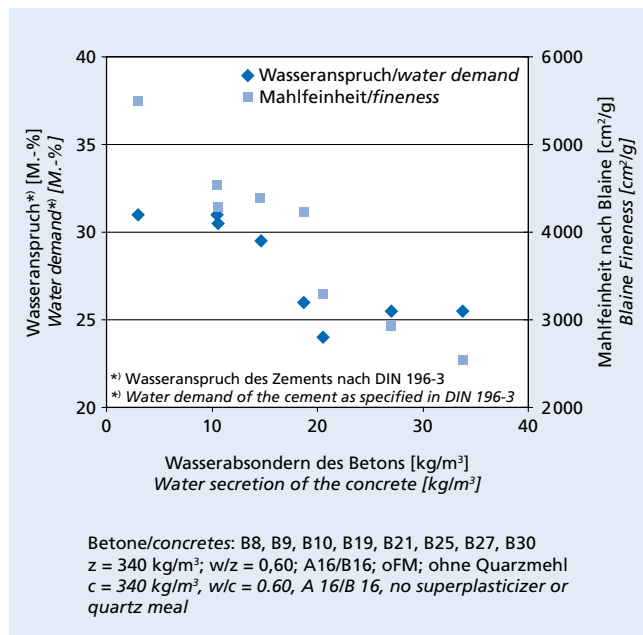


Bild 5: Wasserabsondern in Abhängigkeit von den Zementeigenschaften (Wasseranspruch und Mahlfeinheit) bei Betonen mit w/z = 0,60 ohne Zusatzmittel

Figure 5: Water secretion in relation to the cement properties (water demand and fineness) for concretes with w/c = 0.60 without admixtures

concrete admixtures the type and addition level of the admixture was found to have a significant influence on the quantity of water secreted for a comparable flow-table spread.

The results showed that, on the one hand, the water secretion was virtually independent of the admixture used (Fig. 7, concretes made with CEM III/A cement) while, on the other hand, that the quantity of secreted water in concretes made with CEM I Portland cement and CEM II/A-LL Portland-limestone cement (Fig. 7) was doubled when the PCE-A superplasticizer was used

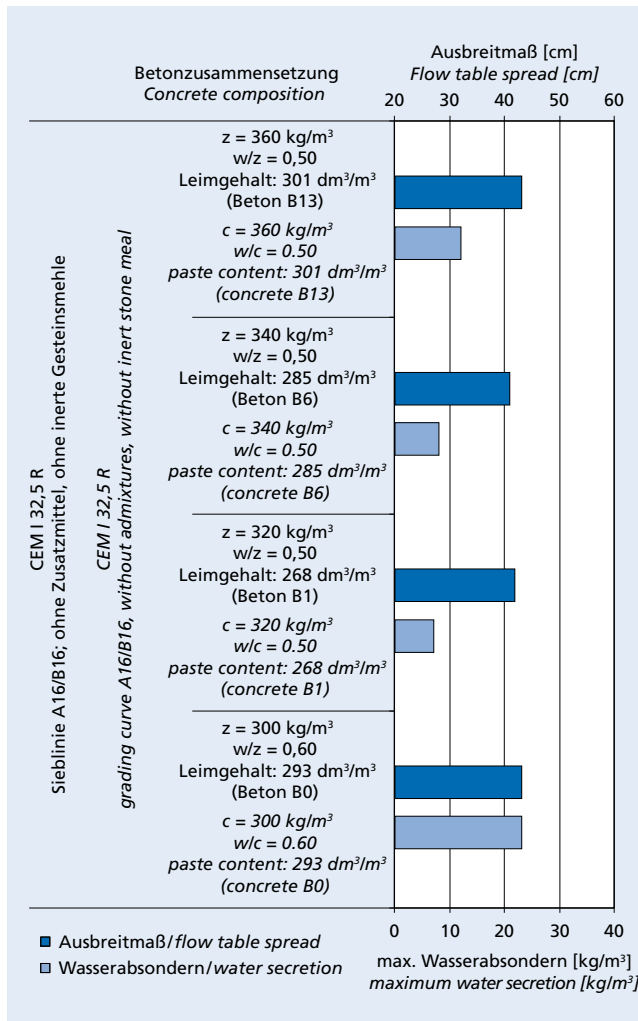


Bild 6: Wasserabsondern des Frischbetons in Abhängigkeit vom Zementgehalt

Figure 6: Water secretion of the fresh concrete relative to the cement content

when compared with melamine and naphthalene sulfates. Double the quantity of secreted water was also recorded when using the MNS admixture and various cements. The concrete made with CEM III/A 42,5 N cement secreted twice as much water (about 5 kg/m³) as the concrete made with CEM II/A-LL 32,5 R cement with comparable consistency (Fig. 7). From a comparison of these results with the quantities of secreted water in relation to the cement used without admixture it must be assumed that the cement/admixture combination sometimes has a substantial influence on the water secretion. The concretes made with CEM II/A-LL 32,5 R and CEM III/A 42,5 N cements without superplasticizer and with a water/cement ratio of 0.60 exhibited virtually the same quantity of secreted water of about 15 kg/m³ (Fig. 4).

The results also showed that the admixture addition level can sometimes have a substantial influence on the water secretion. The influence of the addition level of the admixture was investigated with PCE-A on concretes made with CEM II/A-LL 32,5 R cement and w/c = 0.50. Fig. 8 shows that raising the addition level from 0.6 mass % to 0.8 mass % increased the water secretion from about 2.5 kg/m³ to about 4.5 kg/m³. The flow-table spread rose from about 500 mm to about 540 mm.

Raising the water/cement ratio from 0.50 to 0.53 with otherwise the same concrete composition (cement content and admixture addition level) increased the quantity of secreted water in concretes made with CEM I 32,5 R Portland cement and CEM III/A 42,5 N blastfurnace cement from about 5 kg/m³ to about 23 kg/m³ and 18 kg/m³ respectively. Minor visual symptoms of segregation in the form of watery fringes were detected during the determination of the consistency in the flow-table spread test with the concretes with a water/cement ratio of w/c = 0.53. Raising the water/cement ratio while at the same time changing the admixture addition level to maintain the consistency also led to larger quantities of bleed water.

4.2.4 Influence of the grading curve on water secretion

Not only the influence of the cement, the water content and the admixtures but also the influence of the particle size composition on the consistency and water segregation were examined. The fines content of the A8/B8, A16/B16 and A32/B32 grading curves of about 365 kg/m³ was altered selectively. Fig. 9 shows that a reduction in the maximum particle size in the aggregate and the use of quartz meal to raise the fines content from about 365 kg/m³ to about 398 kg/m³ led in both cases to a reduction in water secretion

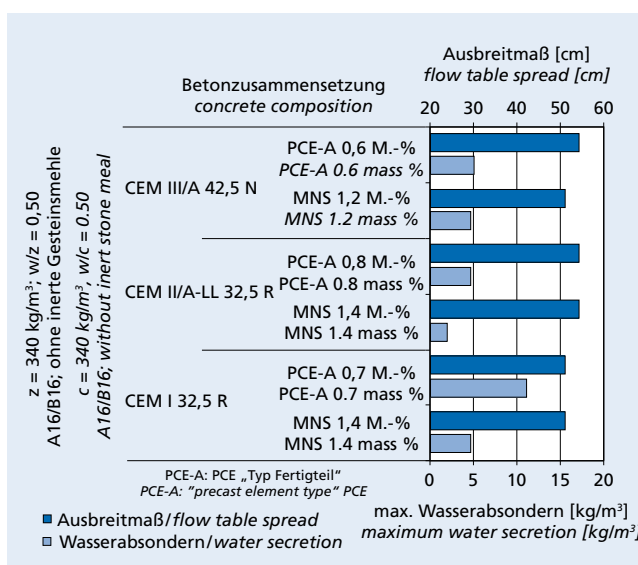


Bild 7: Beispiele für das Ausbreitmaß und das Wasserabsondern von Betonen mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln

Figure 7: Examples of the flow table spread and water secretion of concretes with plasticizing admixtures

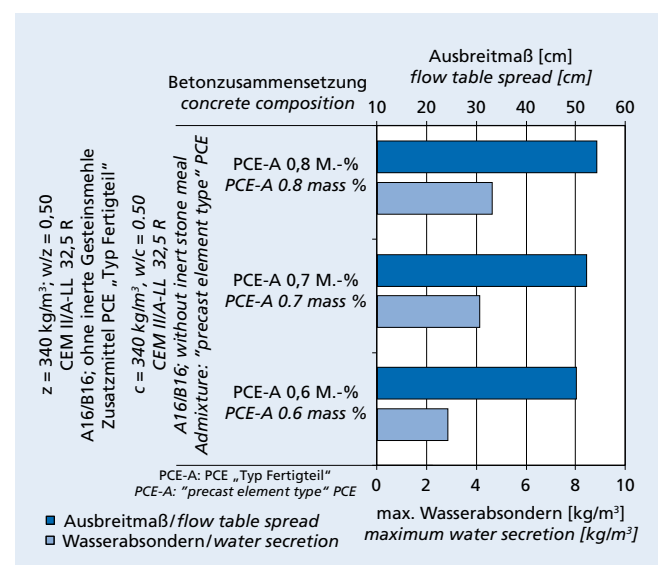


Bild 8: Ausbreitmaß und Wasserabsondern in Abhängigkeit von der Zusatzmitteldosierung

Figure 8: Flow table spread and water secretion in relation to the addition level of admixture

durch Erhöhung der Dosierung von 0,6 M.-% auf 0,8 M.-% von rd. 2,5 kg/m³ auf rd. 4,5 kg/m³ zunahm. Das Ausbreitmaß erhöhte sich von rd. 500 mm auf rd. 540 mm.

Durch die Erhöhung des Wasserzementwerts von 0,50 auf 0,53 erhöhte sich die Blutwassermenge bei sonst gleicher Betonzusammensetzung (Zementgehalt und Zusatzmitteldosierung) bei Beton mit Portlandzement CEM I 32,5 R bzw. Hochofenzement CEM III/A 42,5 N von rd. 5 kg/m³ auf rd. 23 kg/m³ bzw. 18 kg/m³. Bei der Bestimmung des Ausbreitmaßes wurden bei den Betonen mit einem Wasserzementwert von w/z = 0,53 optisch geringfügige Entmischungserscheinungen in Form von Wasserrändern bei der Bestimmung der Konsistenz im Ausbreitversuch festgestellt. Ebenfalls führt eine Erhöhung des Wasserzementwerts bei gleichzeitiger Veränderung der Zusatzmitteldosierung zur Einhaltung der Konsistenz zu höheren Blutwassermengen.

4.2.4 Einfluss der Sieblinie auf das Wasserabsondern

Neben dem Einfluss des Zements, des Wassergehalts und der Zusatzmittel wurde auch der Einfluss der Kornzusammensetzung auf die Konsistenz und das Wasserabsondern untersucht. Hierzu wurde der Mehlkorngehalt der Sieblinien A8/B8, A16/B16 und A32/B32 von rd. 365 kg/m³ gezielt verändert. Bild 9 zeigt, dass die Verringerung des Größtkorns der Gesteinskörnung und die Verwendung von Quarzmehl zur Erhöhung des Mehlkorngehalts von rd. 365 kg/m³ auf rd. 398 kg/m³ jeweils zu einer Verringerung des Wasserabsonderns bei nahezu gleichem Ausbreitmaß führten. Insgesamt betrugen die abgesonderten Wassermengen zwischen rd. 8 kg/m³ und rd. 14 kg/m³.

Der Einfluss der Sieblinie der Gesteinskörnung, insbesondere der Korngruppe 0/2, auf das Wasserabsondern und das Ausbreitmaß von Beton geht aus Bild 10 hervor. Die Grafiken zeigen, dass eine Zunahme des Mehlkorngehalts von 350 kg/m³ auf 370 kg/m³ bei gleichem Volumenanteil der Korngruppe 0/2 (26 Vol.-%) zu einer deutlichen Reduzierung des Wasserabsonderns führen kann. Bei konstantem Mehlkorngehalt von 370 kg/m³ führte ein abnehmender Anteil der Korngruppe 0/2 von 39 Vol.-% auf 26 Vol.-% zu einer Verringerung des Wasserabsonderns von rd. 3,5 kg/m³ auf 0,5 kg/m³ bei nahezu konstantem Ausbreitmaß. Eine Reduzierung der Zusatzmitteldosierung von 2,4 M.-% v. z auf 1,8 M.-% v. z zur Erzielung eines nahezu konstanten Ausbreitmaßes bei veränderter Sieblinie führte ebenfalls zu einem verringerten Wasserabsondern des Betons.

Entsteht durch die Veränderung der Sieblinie eine höhere Packungsdichte der Gesteinskörnung, auf die jedoch nicht mit einer Anpassung insbesondere des Wassergehalts reagiert wird, so ist mit einem Wasserüberschuss und mit Wasserabsondern zu rechnen. Der Beton mit Sieblinie S4 wies von den Betonen die höchste Packungsdichte und den niedrigsten Wasseranspruch auf. Im Ausbreitversuch zeigte er eine leichte Leimumrandung. Die Bildung eines Wasser- bzw. Leimrands beim Ausbreitversuch wurde umso größer, je niedriger der Mehlkorngehalt bei unverändertem Sandanteil war [11].

4.2.5 Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei der Bestimmung des Wasserabsonderns von Beton

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der Bestimmung des Wasserabsonderns wurde durch Doppelbestimmungen an identischen Mischungen sowie durch Einfachbestimmungen an zwei zeitlich unterschiedlich hergestellten Betonen gleicher Zusammensetzung überprüft. Bei den Doppelbestimmungen des Wasserabsonderns nach vier Stunden ergab sich eine Differenz der Einzelwerte von rd. 1,0 kg/m³. Bei Wiederholung der Betonherstellung und erneuter Bestimmung des Wasserabsonderns wurde eine Differenz der Einzelwerte von rd. 1,4 kg/m³ ermittelt. Zusammenfassend lagen die Variationskoeffizienten unabhängig von der Betonzusammensetzung zwischen rd. 10 % und 20 %. In [9] wird für die Bestimmung des Wasserabsonderns mit dem Eimerverfahren ein Variationskoeffizient von 15 % angegeben.

Bei der Bestimmung des Wasserabsonderns nach [9] können somit grundsätzlich Einflüsse aus der Betonzusammensetzung erkannt werden. Die Ergebnisse bestätigen, dass der Einfluss der

für virtuell die same flow-table spread. The quantity of water se- creted lay between about 8 kg/m³ and about 14 kg/m³.

The influence of the aggregate grading curve, especially the 0/2 particle size group, on the water secretion and flow-table spread of concrete can be seen in Fig. 10. The graphs show that an increase in fines content from 350 kg/m³ to 370 kg/m³ for the same volumetric fraction of the 0/2 particle size group (26 vol. %) can lead to a significant reduction in water secretion. At a constant fines content of 370 kg/m³ a decreasing fraction of the 0/2 particle size group from 39 vol. % to 26 vol. % led to a reduction in water secretion from about 3.5 kg/m³ to 0.5 kg/m³ at virtually constant flow-table spread. A reduction in the admixture addition level from 2.4 mass % to 1.8 mass % w.r.t. cement to achieve a virtually constant flow-table spread with changing grading curve also led to reduced water secretion from the concrete.

If the change in grading curve results in a higher packing density of the aggregate and is not taken into account by making an adjustment, particularly in the water content, then surplus water and water secretion can be expected. Of all the concretes the concrete with the S4 grading curve exhibited the highest packing density and the lowest water demand. In the flow-table spread test it showed a slight fringe of paste. The formation of a water or paste fringe in the flow-table spread test became larger the lower the fines content with an unchanged proportion of sand [11].

4.2.5 Reproducibility of the test results in the determination of water secretion from concrete

The reproducibility of the test results in the determination of water secretion was checked by double determinations on identical mixes and by single determinations on two concretes with the same composition that had been produced at different times. A difference in the individual values of about 1.0 kg/m³ was obtained in the double determinations of water secretion after four hours while a difference in the individual values of about 1.4 kg/m³ was found with repetition of the concrete production and fresh determination of the water secretion. Overall, the coefficients of variation lay between about 10 % and 20 % regardless of the concrete composition. A coefficient of variation of 15 % is given in [9] for determination of water secretion by the bucket method.

This basically means that any influence from the concrete composition can be identified in the determination of water secretion as specified in [9]. However, the results confirm that, in some cases,

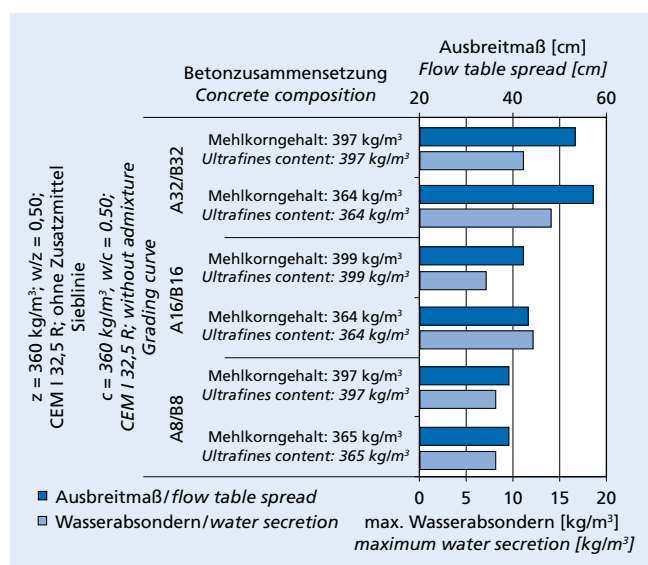
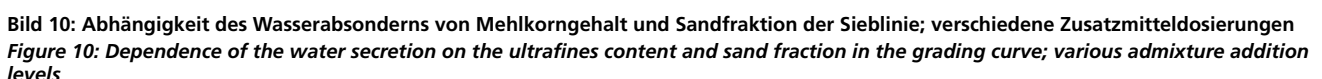


Bild 9: Wasserabsondern von Betonen mit unterschiedlichem Größtkorn der Sieblinie ohne und mit Verwendung von Quarzmehlen. Beispiele von Betonen ohne Zusatzmittel

Figure 9: Water secretion of concretes with different maximum particle sizes in the grading curve, with and without the use of quartz meal. Examples of concretes without admixtures

the influence of the concrete composition on water secretion is overlaid to a substantial extent by factors due to the process [13]. This must be taken into account, particularly for industrial floors, when specifying reference values and limits for water secretion from concrete.



4.3 Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse

4.3.1 Einfluss der Geometrie der Prüfgeräte und der Betonherstellung auf das Wasserabsondern von Beton

Der Einfluss von Prüfgeräten unterschiedlicher Geometrie bei der Bestimmung des Wasserabsonders zur Übertragbarkeit von Laborprüfergebnissen auf Praxisverhältnisse wurde mit handelsüblichen Bau-Eimern verschiedener Nenninhalte untersucht. Die ermittelte Menge an abgesondertem Wasser wurde unabhängig von der Betonzusammensetzung durch das Einfüllvolumen und die Füllhöhe des verwendeten Bau-Eimers beeinflusst. Bild 11 zeigt, dass ein verringertes Einfüllvolumen bei gleicher Füllhöhe zu verringertem Wasserabsondern führte. Bei gleichem Einfüllvolumen erhöhte sich das Wasserabsondern bei verringerter Einfüllhöhe.

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Laborprüfergebnisse auf die Praxis wurden rechteckige Betonplatten mit den Abmessungen 50 cm x 50 cm und einer Dicke von 20 cm und 25 cm hergestellt. Die Untersuchung des Wasserabsonders in den Schalungen wurde in Anlehnung an [9] durchgeführt. Die Betone wurden nach der Herstellung in die Schalungen gefüllt und bis zum Zeitpunkt der Messungen abgedeckt. Zum Zeitpunkt der Messung wurden die Schalungen auf 7 Grad geneigt und die abgesonderte Wassermenge erfasst. Im Anschluss wurde das abgesaugte Wasser auf den Beton zurückgegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass die auf der Plattenoberfläche abgesonderte Wassermenge im Vergleich zu den im Bau-Eimer mit gleicher Einfüllhöhe ermittelten Ergebnissen geringer war und dass sich mit zunehmender Dicke der Platte das Wasserabsondern tendenziell verringerte. Bild 12 zeigt beispielhaft die Ergebnisse.

Mit dem Verfahren nach [9] wird die abgesonderte Wassermenge als Volumen des abgesonderten Wassers je Volumen des Frischbetons angegeben. Es wurde gezeigt, dass anhand der im Prüfeimer abgesonderten Wassermenge auf den Wasserfilm auf der Betonoberfläche für zylindrische oder quadratische Prüfgefäße sowie in erster Näherung für konische Formen wie die benutzten Eimer geschlossen werden kann. Somit bestätigen die mit dem Prüfeimer gewonnenen Ergebnisse, dass der auf der Oberfläche des eingebauten Betons gebildete Wasserfilm durch das Wasserabsondern mit zunehmender Einfüllhöhe zunimmt [17].

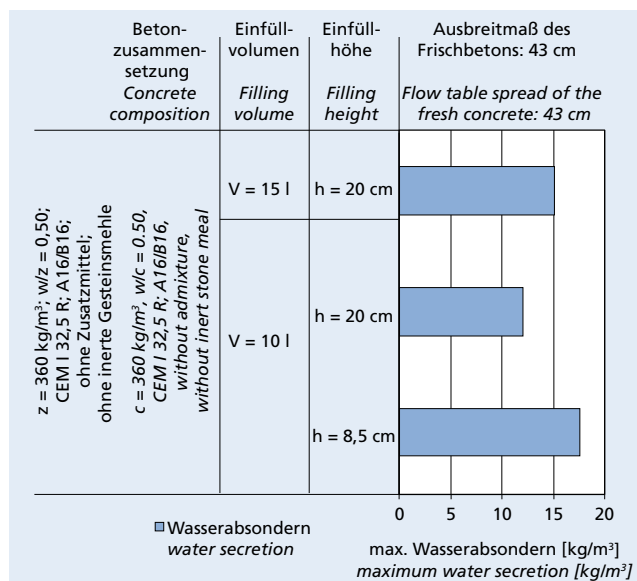


Bild 11: Wasserabsondern bei Veränderung der Einfüllhöhe und des Einfüllvolumens des Betons im Prüfeimer

Figure 11: Water secretion while changing the filling level and filling height of the concrete in the test bucket

4.3 Applicability to practical conditions

4.3.1 Influence of the concrete production and the geometry of the test equipment on water secretion from concrete

In the determination of water secretion the influence of test equipment with varying geometry on the applicability of laboratory test results to practical conditions was investigated with commercially available hand buckets of differing nominal capacity. Regardless of the concrete composition, the quantity of secreted water was affected by the filling volume and filling height of the hand bucket used. Fig. 11 shows that, for the same filling height, a reduced filling volume led to reduced water secretion. For the same filling volume the water secretion rose with reduced filling height.

Rectangular 50 cm x 50 cm concrete plates with thicknesses of 20 cm and 25 cm were produced to test the applicability of the laboratory test results to practical conditions. The investigation of water secretion in formwork was carried out following the procedure specified in [9]. After production the concretes were placed in the formwork and covered until the measurements were taken. For the measurements the formwork was tilted at 7 degrees and the quantity of secreted water was recorded. The water that had been drawn off was then returned to the concrete. The results show that the quantity of water secreted on the surface of the plate was lower than the results determined in the hand bucket with the same filling height, and that the water secretion tended to decrease with increasing thickness of the plate. Fig. 12 shows examples of the results.

With the method specified in [9] the quantity of secreted water is given as the volume of secreted water per volume of fresh concrete. It was found that the quantity of water secreted in the bucket test can be used to draw conclusions about the water film on the concrete surface for cylindrical or square test containers and, to a first approximation, for conical moulds like the bucket used. The results obtained with the test bucket therefore confirm that the film of water formed through water secretion on the placed concrete increases with increasing filling height [17].

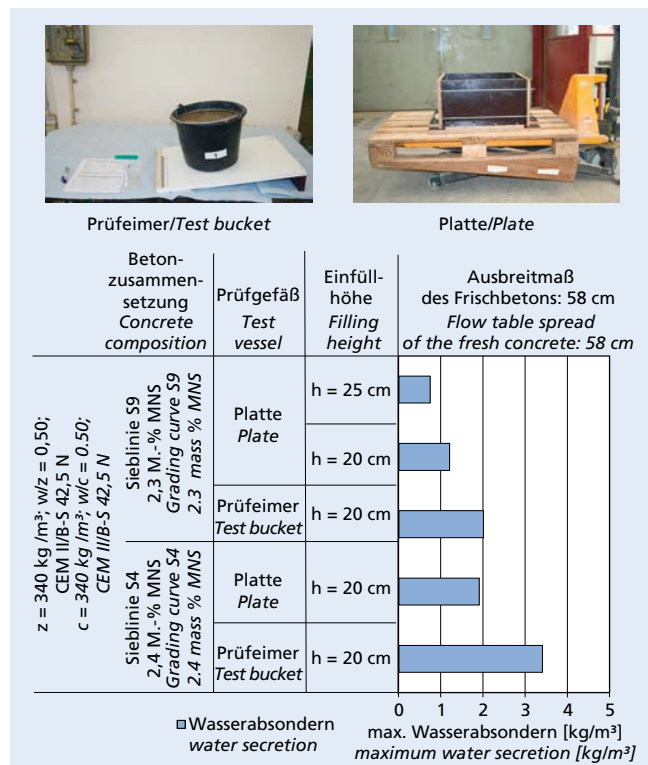


Bild 12: Beispiele für den Geometrieeinfluss auf das Wasserabsondern

Figure 12: Examples of the influence of geometry on the water secretion

4.3.2 Einflüsse der Herstellung und Verarbeitung von Beton auf das Wasserabsondern

Transportbeton wird nach der Herstellung im Werk üblicherweise bis zum Einbau im Transportbetonfahrzeug weiter mit geringer Intensität gemischt. Der Einfluss dieses nachträglichen Mischvorgangs wurde durch die Verwendung eines Trommelmischers im Labor simuliert. Hierzu wurde der Beton zunächst im Tellermischer gemischt und anschließend für weitere 30 min im Trommelmischer rotiert. Der Einfluss dieses nachträglichen Mischens wurde an Betonen mit einem Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 R, einem Zementgehalt von 340 kg/m³ und einem Wasserzementwert von 0,50 unter Verwendung der beiden PCE vom Typ „Fertigteil“ und „Konsistenzhalter“ sowie dem MNS untersucht. Der Beton mit dem MNS-Fließmittel wies bei der Herstellung im Tellermischer ohne nachträgliche Mischung im Trommelmischer ein Wasserabsondern von rd. 4 kg/m³ auf. Durch das nachträgliche Mischen im Trommelmischer für die Dauer von 30 min reduzierte sich die abgesonderte Wassermenge des Betons mit MNS auf rd. 1 kg/m³. Gleichzeitig nahm das Ausbreitmaß von 560 mm auf 490 mm ab. Mit dem PCE vom Typ „Fertigteil“ war das Ausbreitmaß vergleichbar und das Wasserabsondern verringerte sich von rd. 2 kg/m³ auf rd. 1 kg/m³. Mit dem PCE vom Typ „Konsistenzhalter“ betrug die abgesonderte Wassermenge ohne nachträgliches Mischen rd. 14 kg/m³. Durch das nachträgliche Mischen trat mit dem PCE vom Typ „Konsistenzhalter“ nahezu kein Wasserabsondern mehr auf.

Der Einfluss der Verdichtung auf das Wasserabsondern wurde in Laborversuchen mit Rüttelflaschen auf dem Rütteltisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tafel 3 dargestellt. Die Verlängerung der Verdichtungszeit auf dem Rütteltisch führte zu einer leichten Abnahme des Wasserabsonderns. Durch die Verdichtung mit der Rüttelflasche mit gleicher Verdichtungszeit wie auf dem Rütteltisch verringerte sich das Wasserabsondern im Vergleich zur Verdichtung auf dem Rütteltisch.

4.3.3 Einflüsse des Austrocknens der Betonoberfläche auf das Wasserabsondern

Der Einfluss des Austrocknens der Betonoberfläche auf das Wasserabsondern wurde an Prüfeimern nach [9] untersucht. Die Temperatur während der Prüfungen betrug rd. 20 °C. Tafel 4 zeigt, dass sich durch eine fehlende Abdeckung der Prüfkörper, d. h. mit Austrocknung der Oberfläche des Betons, die Menge des abgesonderten Wassers um bis zu 30 % verringerte. Bei Beton B26 wurde kein Unterschied mit und ohne Abdeckung festgestellt. Zusätzlich wurde untersucht, welcher Einfluss auf das Prüfergebn sich einstellt, wenn das abgesaugte Wasser nach der

4.3.2 Influence of the production and processing of concrete on water secretion

After production in the plant, ready-mixed concrete is usually mixed further at a low intensity in the ready-mixed concrete vehicle until it is placed. The influence of this subsequent mixing process was simulated in the laboratory by using a drum mixer. The concrete was first mixed in the pan mixer and then rotated for a further 30 min in the drum mixer. This influence of this subsequent mixing was investigated using concretes made with CEM II/B-S 42,5 R Portland-slag cement with a cement content of 340 kg/m³ and a water/cement ratio of 0.50 using both the “prefabricated component” and the “consistency retainer” types of PCE as well as the MNS. The concrete containing the MNS superplasticizer exhibited a water secretion of about 4 kg/m³ for production in the pan mixer without subsequent mixing in the drum mixer. The quantity of water secreted by the concrete containing MNS was reduced to about 1 kg/m³ by subsequent mixing in the drum mixer for 30 min. At the same time the flow-table spread fell from 560 mm to 490 mm. With the “prefabricated component” type of PCE the flow-table spread was comparable and the water secretion fell from about 2 kg/m³ to about 1 kg/m³. With the “consistency retainer” type of PCE the quantity of secreted water without subsequent mixing was about 14 kg/m³, but subsequent mixing resulted in virtually no water secretion.

The influence of compaction on water secretion was investigated in the laboratory trials with vibrating cylinders and on the vibrating table. The results of these investigations are shown in Table 3. Extension of the compaction time on the vibrating table led to a slight decrease in water secretion. Compaction with a vibrating cylinder reduced the water secretion when compared with compaction on the vibrating table for the same compaction time.

4.3.3 Influence of drying out of the concrete surface on water secretion

The influence of drying out of the concrete surface on water secretion was investigated in test buckets as specified in [9]. The temperature during the tests was about 20 °C. Table 4 shows that defective coverage of the test piece, i.e. with drying out of the concrete surface, reduced the quantity of secreted water by up to 30 %. No difference with and without covering was detected with concrete B26. The effect on the test result that occurs if the water that has been drawn off is not returned to the bucket after the measurement (which is required in [9]) was also examined. It was found, in agreement with [13], that the effect of this deviation from the procedure specified in [9] was slight.

Tafel 3: Wasserabsondern bei unterschiedlichen Verdichtungsarten und -zeiten im Eimerverfahren

Table 3: Water secretion in the bucket test using different types and times of compaction

Verdichtung Compaction		max. Blutwassermenge max. quantity of bleed water [kg/m ³]
Art type	Zeit*) time*) [s]	
Rütteltisch Vibrating table	2 + 2	3,2
	5 + 5	2,8
	10 + 10	2,7
Rüttelflasche Vibrating cylinder	2 + 2	1,9
Beton BM11-S4; MNS: 2,1 M.-% Concrete BM11-S4; MNS: 2.1 mass %		
*) Verdichtungszeit je Lage (Füllung des Prüfeimers in zwei Lagen)) Compaction time per layer (test bucket is filled in two layers)		

Tafel 4: Wasserabsondern verschiedener Betone. Einfluss der Austrocknung und der Rückgabe des Wassers nach der Messung

Table 4: Water secretion from different concretes. Influence of drying and of returning the water after the measurements

Beton Con- crete	z = 320 kg/m³; w/z = 0,60 A16/B16; ohne Zusatzmittel, ohne Quarzmehl/ c = 320 kg/m³; w/c = 0.60 A16/B16; no admixture or quartz meal	max. Wasserabsondern max. water secretion [kg/m³]		
		Abdeckung des Prüfkörpers Test specimen covered		
		Ja yes	Nein no	Ja yes
		Rückgabe des abgesaugten Wassers Return of drawn off water		
		Ja yes		Nein no
B4	CEM I 32,5 R	23	18	21
B20	CEM II/A-LL 32,5 R	9	7	10
B22	CEM II/B-S 42,5 N	10	7	10
B26	CEM II/B-S 32,5 R	13	13	14

Messung nicht wieder in den Eimer zurückgegeben wird, wie in [9] gefordert. In Übereinstimmung mit [13] war der Einfluss dieser Abweichung von der in [9] beschriebenen Vorgehensweise gering.

4.4 Vergleich verschiedener Prüfverfahren zur Bestimmung des Wasserabsonders von Beton

4.4.1 Prüfverfahren nach dem Prinzip des aufstehenden abgesonderten Wassers

An ausgewählten Betonen wurde das Wasserabsondern vergleichend mit dem Eimerverfahren nach [9], dem PVC-Rohrverfahren nach [8] und in Anlehnung an DIN EN 480-4 „Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Bestimmung der Wasserabsonderung des Betons (Bluten)“ durchgeführt. In Tafel 5 sind die Prüfverfahren vergleichend zusammengestellt.

Nach [13, 18] wird das Ergebnis der Prüfung des Wasserabsonders von Beton grundsätzlich durch die Abmessungen, die Geometrie und das Material des Prüfgefäßes sowie durch die Prüfzeiten beeinflusst. Um die Einflüsse auf die Ergebnisse zu minimieren, wurden bei den vergleichenden Prüfungen die gleichen Zeitpunkte der Prüfung gewählt. Für einen Beton mit 300 kg/m^3

4.4 Comparison of different test methods for determining the secretion of water from concrete

4.4.1 Test method based on the principle of secreted surface water

The water secretion from selected concretes was compared using the bucket method specified in [9], the PVC pipe method specified in [8] and by following the procedure in DIN EN 480-4 „Admixtures for concrete, mortar and grouting mortar – determination of water secretion from concrete (bleeding)“. The test methods are compared in Table 5.

According to [13, 18] the result of testing the water secretion from concrete is basically affected by the dimensions, the geometry and the material of the test container and by the testing times. The same testing times were chosen for the comparative tests in order to minimize the effect on the results. For a concrete made with 300 kg/m^3 of CEM I 32,5 R Portland cement, a water/cement ratio of $w/c = 0.60$ and a fines content of 335 kg/m^3 with the A16/B16 grading curve without any admixture the measured water secretion with the pipe method for a filling height of about 400 mm was about 20 kg/m^3 . In the bucket method with a filling height of about 200 mm it was about 13 kg/m^3 . The PVC pipe was compacted with a vibrating cylinder and the test bucket was compacted

Tafel 5: Vergleich unterschiedlicher Prüfverfahren zur Bestimmung des Wasserabsonders

Table 5: Comparison of different test methods for determining water secretion

Prüfverfahren zur Bestimmung des Wasserabsonders Test method for determining water secretion				
Durchführung Procedure		Eimerverfahren nach [9] Bucket test acc. to [9]	Rohrverfahren nach [8] Pipe test acc. to [8]	Bluten nach DIN EN 480-4 Bleeding acc. to DIN EN 480-4
Prüfbehälter Test container	Art Type	Bau-Eimer Hand bucket	Kunststoffrohr Plastic pipe	Zylindrischer fester Behälter Rigid cylindrical container
	Durchmesser Diameter	$250 \pm 30 \text{ mm}$	150 mm	$250 \pm 10 \text{ mm}$
	Höhe Height	mindestens 230 mm at least 230 mm	mindestens 450 mm at least 450 mm	$280 \pm 10 \text{ mm}$
Betonprobe Concrete sample	Einfüllvolumen Filling volume	10 l	nach Einfüllhöhe: According to filling height	
	Einfüllhöhe Filling height	um 10 l zu füllen: fill to 10 l	400 mm	250 mm
Füllung des Prüfbehälters Filling the test container		Zwei Schichten von jeweils einer Hälfte der Einfüllhöhe Two layers, each of half the filling height	Eine Schicht bis Einfüllhöhe One layer up to the filling height	Drei Schichten von jeweils einem Drittel der Einfüllhöhe Three layers, each of one third of the filling height
Verdichtung je Lage Compaction per layer		Aufstampfen/Rütteltisch Ramming/vibrating table	Innenrüttler Internal vibrator	Stampfer/Rütteln Rammer/vibration
Schutz vor Verdunstung Protection against evaporation		Ja Yes	Ja Yes	Ja Yes
Wasserentnahme Water removal	Schrägstellen des Behälters mittels Unterlegholz oder Unterkeil. The container is tilted with piece of wood or chock.			
	Absaugen des angesammelten Wassers mit einer Pipette oder ähnlichem Gerät. The collected water is drawn off with a pipette or similar instrument.			
	Das Gewicht oder das Volumen des Wassers werden bestimmt. The weight or volume of the water is measured.			
Rückgabe des abgezogenen Wassers Return of the water that has been drawn off		Ja Yes	Nein: Wasser wird in einem Messzylinder angesammelt No: the water is collected in a measuring cylinder	
Prüfzeiten Test times	Prüfbeginn Start of test	60 min	30 min	10 min
	Messintervall Measuring interval	60 min	30 min	10 min während der ersten 40 min und danach alle 30 min 10 min during the first 40 min and then every 30 min

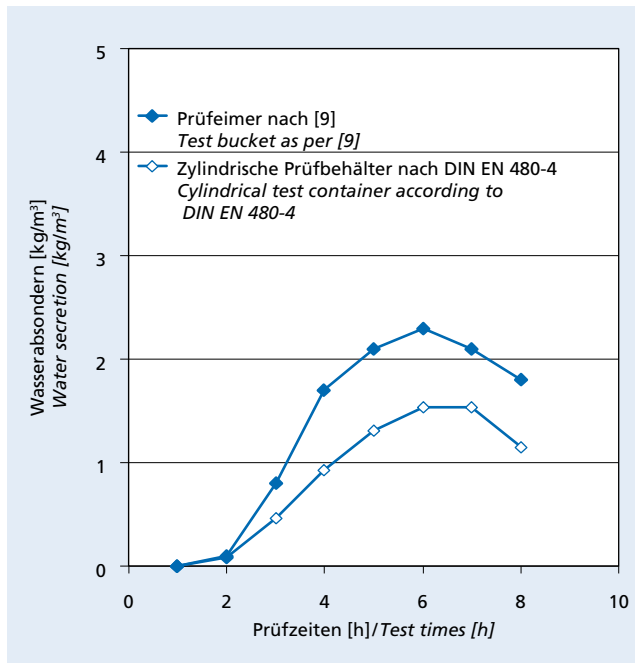


Bild 13: Wasserabsondern mit dem Eimerverfahren nach [9] und in Anlehnung an DIN EN 480-4, Lagerung bei 20 °C
Figure 13: Water seepage with the bucket test as specified in [9] and in accordance with DIN EN 480-4, storage at 20 °C

Portlandzement CEM I 32,5 R, einem Wassermenge-Wert von $w/z = 0,60$, einem Mehlkorngesamt von 335 kg/m^3 mit der Sieblinie A16/B16 ohne Zusatzmittel betrug das mit dem Rohrverfahren bei einer Einfüllhöhe von rd. 400 mm gemessene Wasserabsondern rd. 20 kg/m^3 . Im Prüfeimer bei einer Einfüllhöhe von rd. 200 mm waren es rd. 13 kg/m^3 . Das PVC-Rohr wurde mit einer Rüttelflasche und der Prüfeimer auf dem Rütteltisch verdichtet. Somit wurden mit dem für den Hochbau entwickelten Rohrverfahren niedrigere Werte als mit dem Eimerverfahren festgestellt. Die Prüfung begann 30 min nach dem Einfüllen des jeweiligen Behälters. Die Wasserentnahme erfolgte alle 30 min. Nach [12] ist das Wasserabsondern im Eimerverfahren etwa doppelt so groß wie im „PVC-Rohrverfahren“. Da der Einfluss der Wasserrückgabe nach dem jeweiligen Messintervall auf die Betonoberfläche auszuschließen ist (s. Abs. 4.3.1), können die Unterschiede auf die Geometrie der Prüfkörper und auf die Verdichtung (s. Abs. 4.3.2) zurückgeführt werden. Mit der doppelten Einfüllhöhe und einer rd. 70 % kleineren Oberfläche des Prüfgefäßes im Rohrverfahren können die Ergebnisse mit diesem Verfahren auf Betonböden, die als waagerechte Flächen mit Dicken von rd. 200 mm hergestellt werden, nicht ohne Weiteres übertragen werden.

Für die Baustelle sind die kurzen Prüfintervalle nach DIN EN 480-4 innerhalb der ersten 40 min nicht geeignet [12]. Abweichend von DIN EN 480-4 wurden Prüfbeginn und Prüfintervall mit dem Eimerverfahren nach [9] bei den Vergleichsuntersuchungen identisch gehalten. Die Probekörper wurden auf dem Rütteltisch verdichtet. Bild 13 zeigt, dass die abgesonderte Wassermenge mit dem Eimerverfahren nach [9] höher war als im Prüfbühälter nach DIN EN 480-4. Die Dauer des Wasserabsonderns war im Prüfbühälter nach DIN EN 480-4 um rd. eine Stunde länger als im Prüfeimer nach [9]. Untersuchungen bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C zeigten ebenfalls geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen der Prüfung des Wasserabsonderns mit dem Eimerverfahren und dem Prüfbühälter nach DIN EN 480-4. Zusammenfassend können die Unterschiede auf die Steifigkeit und Geometrie des Prüfbühälters zurückzuführen sein. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse sollte in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen in [13, 20] vor Anwendung des Prüfverfahrens der zu verwendende Eimer festgelegt werden.

on the vibrating table. This means that lower values were obtained by the pipe method developed for building construction than with the bucket method. The testing started 30 min after the respective containers were filled. The water was removed every 30 min. According to [12] the water seepage in the bucket method is about twice as large as in the „PVC pipe method“. The effect of returning the water to the concrete surface after each test interval can be ruled out (see Section 4.3.1) so the differences can be attributed to the geometry of the test piece and to the compaction (see Section 4.3.2). With twice the filling height and a surface of the test container that is about 70 % smaller in the pipe method the results with this method cannot be applied directly to concrete floors that are produced as horizontal areas with thicknesses of about 200 mm.

The short test intervals specified in DIN EN 480-4 within the first 40 min are not suitable for building sites [12]. As a departure from DIN EN 480-4 the start of testing and the test intervals were kept identical with the bucket method specified in [9] for the comparative investigations. The test specimens were compacted on the vibrating table. Fig. 13 shows that the quantity of water secreted with the bucket method specified in [9] was greater than in the test container specified in DIN EN 480-4. The duration of the water seepage was about one hour longer in the test container specified in DIN EN 480-4 than in the test bucket specified in [9]. Investigations at an ambient temperature of 30 °C also showed minor differences in the results of testing the water seepage with the bucket method and with the test container specified in DIN EN 480-4. Basically, the differences can be attributed to the stiffness and geometry of the test containers. Against the background of these results, the type of bucket to be used should, in conformity with the findings in [13, 20], be specified before the test method is applied.

4.4.2 Test method based on the principle of expressed filter water

With the bucket method the results are normally available about 3 h to 6 h after the concrete has been placed. A method has been developed in Austria in which a pneumatic pressure of 3 bar is applied to the fresh concrete with a filter press (Fig. 14 and Section 3.3). The pressure is maintained and information about the mix stability of soft concretes is obtained after 15 min and 60 min on the basis of the quantity of filtrate water that has been expressed. According to [14], stability is understood to mean fairly small seepage of water and fines, even under pressure, a small amount of segregation during transport and placement and a fairly small amount of sedimentation of the coarse aggregate. Preliminary tests, in some cases with a reduction of the test pressure from 3 bar to 1 bar, were carried out as part of the investigations.

With a constant admixture addition level the quantity of filtrate water rose with increasing water/cement ratio. With a constant water content the quantity of filtrate water fell with increasing water demand of the aggregate grading curve. Overall, there was good correlation between the results from the filter press and those



Bild 14: Filterpresse
Figure 14: Filter press

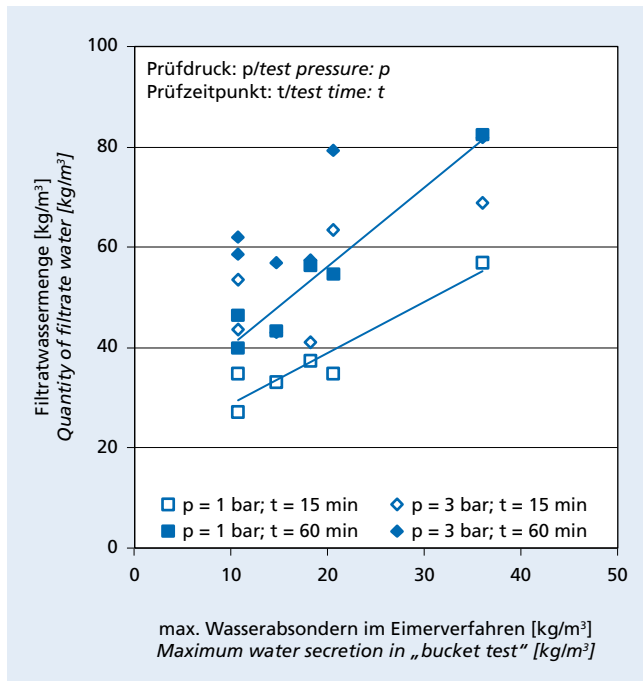


Bild 15: Filtratwassermenge für zwei Prüfdrücke in Abhängigkeit des max. Wasserabsonderns im Eimerverfahren nach [9]. Betone ohne Zusatzmittel

Figure 15: Quantity of filtrate water for two test pressures in relation to the maximum water secretion in the bucket test as specified in [9]. Concretes without admixtures

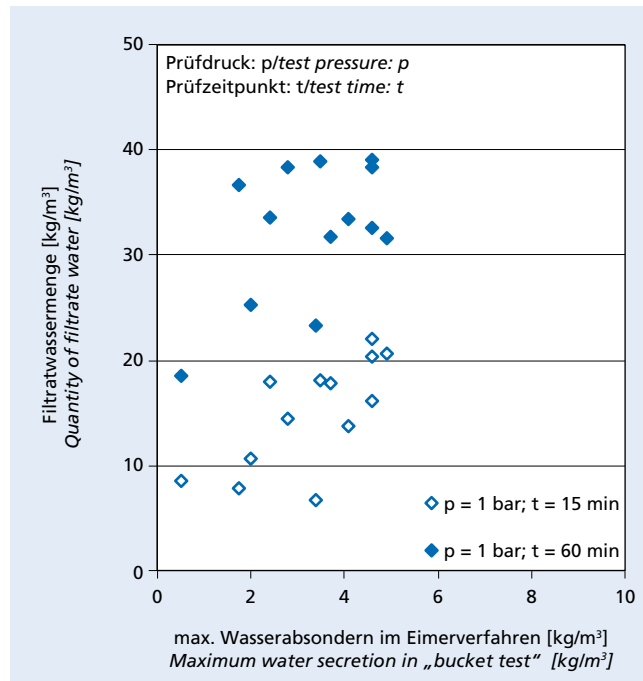


Bild 16: Filtratwassermenge in Abhängigkeit vom max. Wasserabsondern im Eimerverfahren nach [9]. Betone mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln

Figure 16: Quantity of filtrate water in relation to the maximum water secretion in the bucket test as specified in [9]. Concretes with plasticizing admixtures

4.4.2 Prüfverfahren nach dem Prinzip des ausgepressten Filterwassers

Mit dem Eimerverfahren liegen Prüfergebnisse i.d.R. rd. 3 h bis 6 h nach dem Betoneinbau vor. In Österreich wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem mit einer Filterpresse (Bild 14 und Abs. 3.3) ein pneumatischer Druck von 3 bar auf den Frischbeton aufgebracht wird. Der Druck wird aufrechterhalten und nach 15 min und 60 min werden anhand der ausgepressten Filtratwassermenge Aussagen zur Mischungsstabilität weicher Betone getroffen. Unter Stabilität wird nach [14] eine geringere Absonderung vom Wasser und Feinteilen auch unter Druck, eine geringe Entmischung beim Transport und Einbau sowie eine geringere Sedimentation der groben Gesteinskörnung verstanden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden orientierende Versuche z.T. mit Reduzierung des Prüfdrucks von 3 bar auf 1 bar durchgeführt.

Die Filtratwassermenge stieg bei konstanter Zusatzmitteldosierung mit steigendem Wasserzementwert an. Mit steigendem Wasseranspruch der Sieblinie der Gesteinskörnung nahm die Filtratwassermenge bei konstantem Wassergehalt ab. Insgesamt ergab sich eine gute Korrelation zwischen den Ergebnissen der Filterpresse und denen des Eimerverfahrens nach [9] bei Beton mit $w/z = 0,60$ ohne Zusatzmittel bei einem Prüfdruck von 1 bar für die Prüfzeiten von 15 min und 60 min (Bild 15). Die mit dem Eimerverfahren ermittelten betontechnologischen Einflüsse auf das Wasserabsondern von Betonen ohne Zusatzmittel standen in guter Übereinstimmung mit den mit der Filterpresse ermittelten Prüfergebnissen. Bei Betonen, die mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln hergestellt wurden und die ein grundsätzlich geringeres Wasserabsondern aufwiesen, nahm die Korrelation der Ergebnisse beider Verfahren ab (Bild 16).

Das Filterpressenverfahren bietet gegenüber dem Eimerverfahren den Vorteil, dass innerhalb eines kürzeren Zeitraums Ergebnisse erzielt werden können. Die Ergebnisse sind in ihrer Aussage grundsätzlich mit den Ergebnissen des Eimerverfahrens vergleichbar.

from the bucket method specified in [9] for concrete with $w/c = 0.60$ with no admixture at a test pressure of 1 bar for the test times of 15 min and 60 min (Fig. 15). The concrete technology factors affecting water secretion from concretes without admixtures determined by the bucket method agreed well with the test results determined with the filter press. The correlation of the results between the two methods decreased for concretes that had been produced with plasticizing concrete admixtures and that exhibited a fundamentally lower water secretion (Fig. 16).

The filter press method has the advantage over the bucket method that results can be obtained more quickly. The informative value of the results is basically comparable with that of the results from the bucket test.

4.5 Advice on classification and evaluation of the results of investigations into water secretion from concrete

Regardless of the test method used, the water secretion was found to be directly dependent on the water content and on the type and addition level of the plasticizing concrete admixture used as well as on the grading curve. The tendency of concrete to secrete water could be reduced by raising the fines content. The following measures contribute to reducing the water secretion from concrete under laboratory conditions:

- reducing the water content or lowering the water/cement ratio
- increasing the paste content by raising the cement content at constant water content
- raising the fines content in concrete, if necessary with changes to the 0/2 particle size group
- ensuring workability at a given paste content by using concrete admixtures to reduce the water content, bearing in mind the interaction between cement and admixture
- using CEM II Portland-composite cement and CEM III/A blastfurnace cement instead of CEM I Portland cement

4.5 Hinweise zur Einordnung und Bewertung von Untersuchungsergebnissen zum Wasserabsondern von Beton

Unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren zeigte sich eine unmittelbare Abhängigkeit des Wasserabsonderns vom Wassergehalt, dem verwendeten verflüssigenden Betonzusatzmittel und seiner Dosierung sowie von der Sieblinie. Dabei konnte durch eine Erhöhung des Mehlkorngehalts die Neigung des Betons zum Wasserabsondern verringert werden. Folgende Maßnahmen tragen dazu bei, das Wasserabsondern von Beton unter Laborprüfbedingungen zu verringern:

- Reduzierung des Wassergehalts bzw. Herabsetzung des Wasserzementwerts
- Zunahme des Leimgehalts durch Erhöhung des Zementgehalts bei konstantem Wassergehalt
- Erhöhung des Mehlkorngehalts und ggf. Änderungen der Korngruppe 0/2
- bei vorgegebenem Leimgehalt Verarbeitbarkeit sicherstellen durch Verwendung von Betonzusatzmitteln zur Reduzierung des Wassergehalts unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Zement und Zusatzmittel
- Verwendung von Portlandkompositzement CEM II und Hochofenzement CEM III/A-Zementen anstelle von Portlandzement CEM I

Eine Übertragung der im Labor gewonnenen Ergebnisse auf die Bauwerksverhältnisse ist bedingt möglich. Die Ergebnisse an Probekörpern mit einer Höhe bzw. Bauteildicke von rd. 20 cm (Abschnitt 4.3.1) zeigten, dass in der Praxis mit einer Abnahme des Wasserabsonderns im Vergleich zu den Ergebnissen im Eimerverfahren zu rechnen ist. Dies ist u.a. auf die Anwendung von Rüttelflaschen im Vergleich zum Rütteltisch zurückzuführen. Der nachträgliche Mischvorgang während des Transports des Betons zur Baustelle trägt ebenfalls zu einer Abnahme der abgesonderten Wassermenge bei. Falls eine Betonoberfläche in der Praxis austrocknen kann, führt dies zu niedrigeren Blutwassermengen als ohne Austrocknung. Allerdings kann die Verdunstung je nach Umweltbedingungen eine zu rasche Austrocknung der Randzone mit negativen Folgen für die Dauerhaftigkeit bedeuten. Die abgesonderte Wassermenge nimmt mit abnehmenden Umgebungstemperaturen zu.

Untersuchungen mit der Filterpresse an Betonen mit weichen Konsistenzen ergaben eine zeitabhängige Zunahme der Filtratwassermenge. Reproduzierbare Filtratwassermengen wurden 15 min und 60 min nach Mischende ermittelt. Insbesondere für Beton mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$ und ohne verflüssigende Betonzusatzmittel zeigte sich ein guter Zusammenhang zwischen der Filtratwassermenge und dem im Eimerverfahren bestimmten max. Wasserabsondern des Frischbetons. Die abgesonderte Wassermenge allein reicht jedoch zur Beurteilung der Stabilität des Betons im Hinblick auf Entmischung und Sedimentation nicht aus. Hierzu sind weitere Laboruntersuchungen notwendig [10, 19].

5 Zusammenfassung

In diesem Forschungsvorhaben wurden systematisch 61 Betonzusammensetzungen ohne und mit verflüssigenden Betonzusatzmittel im Labor untersucht, um die Optimierungspotenziale von Beton für Industrieböden im Hinblick auf das Wasserabsondern herauszuarbeiten. Im Wesentlichen wurden die Einflüsse der Betonzusammensetzung auf das Wasserabsondern untersucht. Das Wasserabsondern wurde mit dem Eimerverfahren ermittelt. In der Regel zeigten Betone mit CEM II- und CEM III/A-Zementen bei gleicher Betonzusammensetzung ein geringeres Wasserabsondern als Betone mit CEM I-Zement. Das Wasserabsondern war stark abhängig vom Wassergehalt, von der Sieblinie sowie von der Zusatzmittelart und -dosierung.

Eine Übertragung der im Labor gewonnenen Ergebnisse auf die Bauwerksverhältnisse ist bedingt möglich. Mit den vorliegenden Ergebnissen lassen sich betontechnologische Einflüsse auf das Wasserabsondern unter Berücksichtigung baupraktischer Gesichtspunkte abschätzen. Derzeit werden noch Erfahrungen mit

The results obtained in the laboratory can be applied to building site conditions with some reservations. The results obtained with test specimens with a height or component thickness of about 20 cm (Section 4.3.1) showed that a decrease in water secretion can be expected under practical conditions when compared with the results from the bucket method. This is attributable to, among other things, the use of vibrating cylinders as compared with the vibrating table. The subsequent mixing process during transport of the concrete to the building site also contributes to a decrease in the quantity of water secreted. If a concrete surface can dry out under practical conditions this leads to smaller quantities of bleed water than without any drying out. However, depending on the ambient conditions, the evaporation can cause excessively rapid drying of the edge zones with negative consequences for the durability. The quantity of secreted water increases with decreasing ambient temperature.

Investigations with the filter press on concretes with soft consistencies showed a time-dependent increase in the quantity of filtrate water. Reproducible quantities of filtrate water were measured 15 min and 60 min after the end of mixing. There was good correlation between the quantity of filtrate water and the maximum water secretion from fresh concrete determined by the bucket method, especially for concrete with a water/cement ratio $w/c = 0.60$ without plasticizing admixture. However, the quantity of secreted water is not by itself sufficient for assessing the stability of the concrete with respect to segregation and sedimentation. This will require further laboratory investigations [10, 19].

5 Summary

Sixty one concrete compositions with and without admixtures were investigated in the laboratory in this research project in order to work out the optimization potential of concrete for industrial floors with respect to water secretion. The investigation focused mainly on the influence of the concrete composition on water secretion. The "bucket test" was used to measure the water secretion. As a rule, concretes of the same composition made with CEM II and CEM III/A cements exhibited less tendency to bleeding than concretes made with CEM I cement. The water secretion was heavily dependent on the water content, the grading curve as well as the type and addition level of the additives.

The results obtained in the laboratory can be applied to a limited extent to building conditions.

The results that were obtained make it possible to assess the concrete technology factors affecting the water secretion while taking the practical construction aspects into account. Experience with the respective test methods is still being gathered so, as a rule, it is not yet possible to use fixed limits, but reference values should be used instead.

den jeweiligen Prüfverfahren gesammelt, sodass man i.d.R. noch nicht von festen Grenzwerten, sondern von Anhaltswerten sprechen sollte.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16328 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. bzw. VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Funding note

IGF project 16328 N of the Research Association of the VDZ (German Cement Works Association) and of VDZ gGmbH was funded through the AiF (Federation of Industrial Cooperative Research Associations) as part of the programme by the Federal Ministry for Economics and Energy based on a decision by the German Federal Parliament to promote joint industrial research and development (IGF).

Literatur / Literature

- [1] Breitenbücher, R.: Potentielle Ursachen von Mängeln in Industrieböden aus Beton und deren Bewertung. Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe, März 2007, Universitätsverlag, Karlsruhe 2007, S. 73–81
- [2] Hartkorneinstreuung für Industrieböden. Industrieböden 1999. Internationales Kolloquium 12.–16. Januar 1999. Herausgeber P. Seidler, Esslingen 1999
- [3] Ebeling, K.: Betonböden für Produktions- und Lagerhallen. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2006
- [4] Kosmatka, S.: Bleed water. In: Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, Chapter 12, ASTM special technical publication 169 D, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia 2006
- [5] Krell, J.: Oberfläche und Nachbehandlung von Betonböden. Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe (TH), 15. März 2007, Universitätsverlag, Karlsruhe 2007, S. 63–72
- [6] Krell, J.: Bluten von Beton. beton 63 (2013) H. 1+2, S. 8–12
- [7] Schmidt, M.: Optimierung der Betonzusammensetzung zur Erzielung dauerhafter Oberflächeneigenschaften. Vortrag auf der Betonstraßentagung, Köln 2005
- [8] Schießl, P.; Weber, J. W.; Schwamborn, B.; Leißner, J.: Bluten von Frischbeton. In: Schriftenreihe des Bundesverbands der Deutschen Transportindustrie. Beton-Verlag, Düsseldorf 1998
- [9] Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton. Merkblatt Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V. (DBV), Berlin 2007
- [10] Wöhl, U.: Betontechnologische Aspekte bei der Ausführung von Bodenplatten. Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe (TH), 15. März 2007, Universitätsverlag, Karlsruhe 2007, S. 57–61
- [11] VDZ gGmbH (Hrsg.): Zielsichere Herstellung von Industrieböden für Frei- und Hallenflächen. AiF-Forschungsvorhaben Nr. 16328N (Schlussbericht), Düsseldorf 2012
- [12] Wagner, J.-P.; Reichertz, A. et al.: Bluten von Frischbeton. Versuchsergebnisse mit dem Eimerverfahren des DBV-Merkblatts. beton 57 (2007) H. 12, S. 558–565
- [13] Heese, C.; Breit, W.: Ermittlung der Blutneigung im Eimerverfahren. Verfahrensbedingte Einflussparameter. beton 62 (2012) H. 4, S. 110–115
- [14] Merkblatt Weiche Betone. Betone mit Konsistenz $\geq$ F59. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien 2009
- [15] Wierig, H. G.; Schöner, W.; Suhr, S.; Scholz, E.: Untersuchungen über das Bluten von Zementleimen. Mitteilungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung, Heft 64, Universität Hannover 1992
- [16] Rickert, J.; Strehlein, D.: Vermeidung von Farbunterschieden in Sichtbetonflächen. Mischungsstabilität und Transportphänomene. AiF-Forschungsvorhaben 14079 N1/I. Schlussbericht. Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ, Düsseldorf 2006
- [17] Hoshino, M.: Relationship between bleeding, coarse aggregate, and specimen height of concrete. ACI Materials Journal, March–April 1989, S. 185–190
- [18] Kiltz, D.; Siebert, B.: Erfahrungen mit dem Eimerverfahren zur Bestimmung der Blutneigung von Beton. beton 63 (2013) H. 1+2, S. 14–17
- [19] Nischer, P.; Macht, J.: Weiche Betone mit verschiedenem Mehlkorn. Maßnahmen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Betonwerk und Fertigteil-Technik 72 (2006) H. 8, S. 42–53
- [20] Alonso, M. T.; Schäffl, P.: Zielsichere Herstellung von Industriebetonböden. In Vorbereitung zur Veröffentlichung in der Fachzeitschrift beton

Maria Teresa Alonso und Patrick Schäffel, Düsseldorf

Zielsichere Herstellung von Industriebetonböden – Praxis- und Laborergebnisse sowie Hinweise zur Stabilität

Dependable production of concrete industrial floors – practical results, laboratory results and some notes on stability

Übersicht

Fehler in der Planung und Herstellung von Betonböden für Frei- und Hallenflächen verursachen kostspielige Schäden. Planer und Bauausführende klagen über fehlende technische Regeln und Prüfkriterien für diese Bauweise. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen liefern Erkenntnisse zu praxisrelevanten Anhaltswerten für die Betonzusammensetzung, die Einbaukonsistenz und das Wasserabsondern. Hierfür wurden neben Laboruntersuchungen eine praxisbasierte systematische Datensammlung zur Betonzusammensetzung deutscher Baustellen angelegt und baustellenbegleitende Untersuchungen durchgeführt. Die Laboruntersuchungen zeigen, dass erweiterte Erstprüfungen erforderlich sind, um die Stabilität des Betons unter Berücksichtigung der Zielwerte für die Konsistenz und das Wasserabsondern sicherstellen zu können. Anhand der Ergebnisse der Eignungsprüfungen im Labor wurde eine Betonzusammensetzung entwickelt, die für die qualifizierte Verarbeitung zu einer hochwertigen Industriebodenfläche in der Praxis geeignet war.

1 Einleitung

Industrieböden für Frei- und Hallenflächen sind in der Regel während ihrer Nutzung hohen Beanspruchungen ausgesetzt und benötigen daher dauerhafte Gebrauchseigenschaften. Die Anforderungen an ihre Oberflächeneigenschaften, wie zum Beispiel an den Verschleißwiderstand und die Ebenheit, die unmittelbar von der Stabilität des Betons bei Einbau und Bearbeitung abhängig sind, sind hoch.

Kriterien für geeignete Betonzusammensetzungen, die die betontechnologischen Anforderungen in verschiedenen Ausführungssituationen sicher erfüllen, stehen derzeit nur bedingt zur Verfügung. Aus der Praxis sind Schadensfälle bekannt, die als Folge ungünstigen Zusammenwirkens betontechnologischer Parameter, der Umgebungsbedingungen und der Herstellung (Einbau- und Baustellengegebenheiten) angesehen werden können. Ursache von Schadensfällen können mangelnde Stabilität des Betons durch Wasserabsondern (Bluten) und ungewöhnliche Erhärtungsvorgänge, wie verzögertes oder plötzliches Erstarren, bei Einbau und Bearbeitung unter Baustellenbedingungen sein.

Unzureichende technische Regeln [1, 2] erschweren zudem die Planung und Herstellung von Betonböden. Eine Besonderheit bei Industrieböden im Gegensatz zu konstruktiven Betonbauteilen besteht darin, dass diese in der Regel keine tragenden Bauteile sind und die Regeln der DIN 1045 nicht in jedem Fall zur Anwendung kommen. Hinweise für die Herstellung von Betonböden sind in Merkblättern des Bundesverbands Estrich und Belag e.V. (BEB), des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins E.V. (DBV) und in Fachveröffentlichungen [3, 4, 5, 6] enthalten. Diese Hinweise führen bei der Planung und Ausführung von Industriebetonböden

Abstract

Faults in the design and production of concrete floors for outdoor and covered surfaces can cause expensive damage. Designers and building contractors complain about the lack of technical regulations and test criteria for this type of construction. The results of the present investigations provide some findings relating to practical guide values for the concrete composition, placement consistency and water secretion. In addition to the laboratory investigations a systematic collection of data for the concrete compositions actually used on German construction sites was compiled for this purpose and investigations were carried out at the construction sites. The laboratory investigations show that extended initial tests are needed to ensure the stability of the concrete while taking account into the target values for consistency and water secretion. With the aid of the results of the suitability tests in the laboratory a concrete composition was developed that proved suitable in practice for skilled processing into high-grade industrial floor areas.

1 Introduction

Industrial floors for exposed and covered areas are usually subjected to heavy stresses during their use and therefore require durable performance characteristics. Heavy demands are made on their surface properties, such as wear resistance and evenness, that are directly dependent on the stability of the concrete during placement and processing.

There are currently only limited criteria available for suitable concrete compositions that reliably fulfil the concrete technology requirements in different applications. Cases of damage are known from practice that can be considered to be the consequence of unfavourable interaction between concrete technology parameters, ambient conditions and production (placement and construction site factors). The reasons for cases of damage may be deficient stability of the concrete due to water secretion (secreting) and unusual hardening events, such as delayed or sudden setting, during placement and processing under construction site conditions.

The design and production of concrete floors is also made more difficult by inadequate technical regulations [1, 2]. One peculiarity of industrial floors when compared with structural concrete elements is that, as a rule, they are not load-bearing elements and the regulations in DIN 1045 are not always applicable. Advice on the construction of concrete floors is contained in the instruction sheets issued by the BEB (Federal Association for Screeds and Overlays) and the DBV (German Concrete and Civil Engineering Association) as well as in technical publications [3, 4, 5, 6]. This advice does not always lead to satisfactory results in the design and construction of concrete industrial floors. Ready-mixed concrete producers complain that according to DIN 1045-2 they should design suitable concrete compositions for the XM exposure class

nicht immer zu zufriedenstellenden Ergebnissen. Transportbetonhersteller beklagen, dass sie nach DIN 1045-2 geeignete Betonzusammensetzungen für die Expositionsklassen XM entwerfen sollen, jedoch keine Hinweise finden, wann ein Beton für eine entsprechende Oberflächenbehandlung geeignet ist. Zudem liegen keine geeigneten Abnahme-/Übergabekriterien vor. Häufig werden zunächst Transportbetonhersteller bei auftretenden Mängeln und Schäden zur Verantwortung gezogen.

Wann die Stabilität einer Betonzusammensetzung gegeben ist, kann mit Blick auf eine geeignete Kornpackung, abgestimmte Fließmitteldosierung und planmäßige Wechselwirkung zwischen Fließmittel und Zement derzeit nicht sicher beantwortet werden [1, 7]. Die vielseitige Abhängigkeit des Wasserabsonderns des Betons von der Betonzusammensetzung und Faktoren wie Bauablauf und Bauteilgeometrie erfordern gezielte Erstprüfungen [8–11]. Die Menge an Wasser, die bei Einbau und Bearbeitung, insbesondere von horizontalen Bauteilen, verträglich sein kann, ist aber nicht definiert. Darüber hinaus fehlen Kenntnisse über die Zusammensetzung und Dicke des Oberflächenmörtels in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung und Betonverarbeitung. Diese sind erforderlich insbesondere im Hinblick auf eine weitere Oberflächenbearbeitung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zurzeit wissenschaftlich begründete Erkenntnisse fehlen, die Planern, Betonherstellern und bauausführenden Unternehmen bei der Erstellung von Industriebetonböden unterstützen können.

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens Nr. 16328 N [12] im Forschungsinstitut der Zementindustrie Untersuchungen zur Optimierung der Betonzusammensetzung mit dem Ziel durchgeführt, Hinweise zur Verringerung der Sedimentations- und Entmischungsneigung von Betonen für Industrieböden geben zu können.

2 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung von Empfehlungen zur zielsicheren Herstellung von Industriebetonböden. Hierbei sollte die Betonzusammensetzung optimiert werden, um Sedimentations- und Entmischungsneigung zu verringern. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

- Erarbeitung einer praxisbasierten Datensammlung und Auswertung von baustellenbegleitenden Untersuchungen mit dem Ziel, baupraktisch relevante Betonzusammensetzungen für Industriebetonböden zu ermitteln
- Erweiterung der Erkenntnisse über geeignete Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität sowie Quantifizierung maßgebender Werte der Konsistenz und des Wasserabsonderns

but cannot find any advice about whether a concrete is suitable for appropriate surface treatment. There are also no suitable acceptance/hand-over criteria available. Ready-mixed concrete producers are often held responsible at first for any deficiencies and damage that occur.

In terms of suitable particle packing, matched addition level of superplasticizer and systematic interaction between superplasticizer and cement, it is not at present possible to state reliably if the stability of a concrete composition is established [1, 7]. The varied dependence of water secretion from concrete on the concrete composition and factors such as construction sequence and geometry of the structural element necessitates carefully controlled initial testing [8–11]. However, the quantity of water that can be tolerated during placement and processing, especially of horizontal structural elements, is not defined. There is also a lack of knowledge concerning the composition and thickness of the surface mortar in relation to the composition and processing of the concrete. This is essential, especially with respect to further surface treatment.

The situation can be summarized by stating there is currently a lack of scientifically based knowledge that can support designers, concrete producers and contractors in the construction of concrete industrial floors.

Against this background, investigations have been carried out at the Research Institute of the Cement Industry as part of IGF Research Project No. 16328 N [12] to optimize the concrete composition with the aim of providing advice on reducing the tendency to sedimentation and segregation in concrete for industrial floors.

2 Aim and extent of the investigations

The aim of the research project was to develop recommendations for dependable production of concrete industrial floors. The intention was to optimize the concrete composition in order to reduce the tendency to sedimentation and segregation. The following steps were taken:

- Preparation of a practical collection of data and evaluation of construction-site investigations with the aim of determining relevant and practical concrete compositions for concrete industrial floors
- Extension of the knowledge relating to suitable test methods for assessing the stability and quantifying relevant values for consistency and water secretion
- Specifying concrete technology measures for achieving the properties required for concrete industrial floors (e.g. segregation stability).
- Production of an industrial floor under practical conditions on the basis of this knowledge

Tafel 1: Zementeigenschaften
Table 1: Cement properties

Zemente Cements	Zementeigenschaften Cement properties							
Zementart Cement type	Dichte [g/cm³] Density [g/cm³]	Mahlfeinheit nach Blaine [cm²/g] Fineness Blaine [cm²/g]	Wasseranspruch [M.-%] Water demand [mass %]	Erstarrung [min] Setting time [min]		Druckfestigkeit [MPa] Compressive strength [MPa]		
				Beginn Initial	Ende Final	2 d	7 d	28 d
CEM I 32,5 R	3,06	2540	25,5	205	240	16,7	33,5	46,8
	3,06	3300	24,0	180	225	20,3	37,0	46,4
CEM II/A-LL 32,5 R	3,01	4230	26,0	130	165	24,7	42,0	48,5
CEM II/B-S 42,5 N	3,02	4540	31,0	190	240	21,5	37,1	54,6
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	3,01	4280	30,5	200	240	21,3	32,1	43,1
CEM III/A 42,5 N	2,96	4390	29,5	205	255	19,0	36,0	57,9

- Festlegung betontechnologischer Maßnahmen zur Erzielung der für Industriebetonböden erforderlichen Eigenschaften (z.B. Entmischungsstabilität)
- Basierend auf diesen Erkenntnissen Herstellung eines Industriebetonbodens unter Praxisbedingungen

3 Untersuchungen

3.1 Erarbeitung einer Praxisdatensammlung und baustellenbegleitende Untersuchungen

Am Anfang des Projekts standen die Erarbeitung einer praxisbasierten Datensammlung sowie die Dokumentation der Herstellung von Industriebetonböden auf Baustellen. Die Datenaufbereitung und die Untersuchungen auf den Baustellen wurden durch das Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung (IBF) durchgeführt. Die Erhebung erfolgte im Verlauf des Jahres 2010 anhand einer Checkliste auf 45 Baustellen. Es wurden Daten zu den Betonzusammensetzungen und den Frischbetoneigenschaften unter praktischen Bedingungen, d.h. unter Berücksichtigung der Baustellengegebenheiten ermittelt. Neun Bauvorhaben wurden direkt begleitet. Erfasst wurden dabei alle Phasen der Herstellung des Industriebetonbodens, vom Beginn des Betonierens bis zum Glätten der Betonoberfläche. Neben Bauteil- und Gebäudedaten wurden Daten zur Betonzusammensetzung erfasst und der Einbau des Betons dokumentiert.

3.2 Labortechnische Untersuchungen

3.2.1 Betonzusammensetzungen

Die labortechnischen Untersuchungen wurden mit einer typischen Betonzusammensetzung für Industriebetonböden durchgeführt. Der Zementgehalt der Betone betrug 340 kg/m^3 . Die Betone wurden mit Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 0,60 hergestellt. Hierfür wurden Betone mit sechs verschiedenen Zementen, vier Zusatzmitteln und dreizehn Sieblinien hergestellt. Das Zugabewasser wurde dem Düsseldorfer Leitungsnetz entnommen.

Die Mahlfeinheit der Zemente (gemessen nach Blaine) betrug zwischen $2540 \text{ cm}^2/\text{g}$ beim CEM I 32,5 R und $4540 \text{ cm}^2/\text{g}$ für den CEM II/B-S 42,5 N. Die Mahlfeinheiten der CEM II- und CEM III/A-Zemente lagen über der Mahlfeinheit des CEM I 32,5 R. Die Korngrößenverteilungen der CEM II- und CEM III/A-Zemente wiesen im Vergleich zu den Portlandzementen einen größeren Anteil feiner Partikel auf. Der Wasseranspruch dieser Zemente war größer als der Wasseranspruch der beiden Portlandzemente. Tafel 1 enthält die Zementeigenschaften der verwendeten Zemente.

3 Investigations

3.1 Preparation of a collection of practical data and investigations on construction sites

The project started with the preparation of a collection of practical data and documentation of the production of concrete industrial floors on construction sites. The preparation of data and the investigations on construction sites were carried out by the IBF (Institute for Building Concretes Testing and Flooring Research). The survey took place during 2010 at 45 construction sites with the aid of a check list. Data were obtained concerning the concrete compositions and fresh concrete properties under practical conditions, i.e. taking account of the construction site conditions. Nine construction projects were directly supervised. All phases of the production of the concrete industrial floor were covered, from the start of concreting to smoothing the concrete surface. Not only were data on the structural elements and structures recorded but also data on the concrete composition, and the placement of the concrete was documented.

3.2 Laboratory investigations

3.2.1 Concrete compositions

The laboratory investigations were carried out with a typical concrete composition for concrete industrial floors. The cement content of the concretes was 340 kg/m^3 . The concretes were produced with water/cement ratios between 0.50 and 0.60 using six different cements, four admixtures and thirteen grading curves. The mixing water was taken from the Düsseldorf mains system.

The Blaine fineness of the cements lay between $2540 \text{ cm}^2/\text{g}$ for CEM I 32,5 R cement and $4540 \text{ cm}^2/\text{g}$ for the CEM II/B-S 42,5 N cement. The CEM II and CEM III/A cements were finer than the CEM I 32,5 R cement. The particle size distributions of the CEM II and CEM III/A cements had a greater proportion of fine particles than the Portland cements. The water demand of these cements was greater than the water demand of the two Portland cements. Table 1 lists the cement properties of the cements used.

The target consistency, measured as the flow-table spread 35 min after the end of mixing, was $(540 \pm 20) \text{ mm}$. This time was specified with a view to the typical travelling times for ready-mixed concrete. The consistency was controlled with concrete admixtures complying with DIN EN 934-2. A superplasticizer based on a combination of melamine and naphthalene sulfonates (MNS) and a polycarboxylate ether (PCE) of the "prefabricated component" type was used. A BV concrete plasticizer was also used, and a polycarboxylate ether (PCE) of the "consistency retainer" type was also used in individual cases.

Tafel 2: Verwendete Sieblinien

Table 2: Grading curves used

Gesteinskörnung Rheinkies Rhine gravel aggregate													
Siebweite [mm] Mesh width [mm]	Siebdurchgang [Vol.-%] Screen undersize [vol. %]												
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	SW
0,063	0,2	2,0	1,0	1,0	1,4	1,2	1,0	0,7	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
0,125	0,4	3,1	1,6	1,6	2,2	1,9	1,6	1,1	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6
0,25	2,6	5,4	3,6	3,6	4,3	4,1	3,7	2,9	2,6	3,8	3,5	4,4	3,3
0,5	13,3	14,4	11,8	11,8	12,5	13,1	12,7	11,1	11,5	19,2	17,7	22,4	16,3
1	22,8	22,1	19,0	19,1	19,7	21,0	20,5	18,4	19,3	32,6	30,1	38,1	27,6
2	31,8	32,0	32,1	38,7	32,8	28,0	26,0	38,0	24,8	37,7	34,9	44,0	31,8
4	45,8	45,8	45,4	47,9	46,1	42,4	38,3	47,2	37,1	46,2	43,4	52,8	36,5
8	68,6	68,6	67,5	63,4	68,1	66,2	59,1	62,7	58,0	62,0	59,8	68,1	55,0
16	98,4	98,4	98,3	98	98,3	98,2	97,8	98,0	97,8	98,6	98,5	98,8	98,3
32	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Die Zielkonsistenz, gemessen als Ausbreitmaß 35 Minuten nach Mischende, betrug (540 ± 20) mm. Die Festlegung auf diesen Zeitpunkt erfolgte mit Blick auf typische Fahrzeiten für Transportbeton. Die Konsistenzsteuerung erfolgte mit Betonzusatzmitteln gemäß DIN EN 934-2. Hierfür wurde ein Fließmittel basierend auf einer Kombination von Melamin- und Naphthalinsulfonaten (MNS) sowie ein Polycarboxylatether (PCE) „Typ Fertigteil“ verwendet. Ergänzend wurde ein Betonverflüssiger BV eingesetzt. In einzelnen Fällen wurde ein Polycarboxylatether (PCE) „Typ Konsistenzhalter“ benutzt.

Durch eine gezielte Variation der Feinmörtelzusammensetzung wurden die Sedimentationsneigung und das Wasserabsondern der Betone beeinflusst. Dazu wurden die Sieblinien A16/B16 mit und ohne die Korngruppe 0/0,125 verwendet. Ergänzend wurden Variationen der Korngruppe 0/2 vorgenommen. Es wurden Rheinkies-Gesteinskörnungen gemäß DIN EN 12620 verwendet. Tafel 2 enthält die Daten zu den verwendeten Sieblinien. Der Einfluss von Wassergehaltsschwankungen, wie z.B. durch den variierenden Feuchtegehalt der Gesteinskörnung, wurde bei gezielter Variation des Wassergehalts untersucht.

3.2.2 Untersuchungen

An allen Betonen wurden die Konsistenz auf dem Ausbreitisch nach DIN EN 12350-5, der Luftgehalt nach DIN EN 12350-7, die Frischbetonrohddichte gemäß DIN EN 12350-6 und das Wasserabsondern mit dem Eimerverfahren nach [11] bestimmt.

Weiterhin erfolgte eine optische Beurteilung der Entmischungsneigung bzw. der Mischungsstabilität durch die Beobachtung des Ausbreitkuchens nach der Bestimmung der Konsistenz des Frischbetons. Die Beurteilung des Sedimentationsverhaltens der Betone erfolgte ebenfalls visuell. Hierfür wurden die erhärteten Betonkörper jeweils aus dem Eimer entnommen. Die Betone wurden trocken angesägt und gespalten. Anhand der Spaltflächen wurde die Entmischungsneigung beurteilt.

Hinweise für die Übertragung auf die Praxis wurden mit prismatischen Probekörpern mit einer Fläche von 50 cm x 50 cm und einer Höhe von 20 cm im Labor gewonnen [13]. Die abgesonderte Wassermenge der Probekörper wurde in Anlehnung an das DBV-Merkblatt [11] bestimmt.

Zur Bestimmung des Erstarrens von Beton wurde das Knetbeutelverfahren nach DIN 18218 angewendet. Ebenfalls wurde zur Bestimmung des Erstarrungsverhaltens des Frischbetons der Eindringwiderstand nach [1] gemessen. Bei diesem Verfahren wird die erforderliche Eindringkraft eines Metallkegels (Kreiskegel 20°) in die Frischbetonoberfläche bis zu einer Eindringtiefe von 20 mm mithilfe einer Kraftmessdose ermittelt.

Folgende Festbetoneigenschaften wurden bestimmt: Rohdichte und Druckfestigkeit sowie die Oberflächenzugfestigkeit des Betons. Die Druckfestigkeit des Betons wurde nach DIN EN 12390-3 an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm ermittelt. Die Herstellung und Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2, Berichtigung 1. Die Rohdichte des Betons wurde aus der Masse und den Abmessungen der Würfel unmittelbar vor der Prüfung der Druckfestigkeit ermittelt. Die Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit des Betons erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1542. Die Oberflächenzugfestigkeit wurde aus der Zugkraft beim Abriss der kreisförmigen oder quadratischen Prüfstempel ermittelt. Diese Prüfstempel wurden an die Betonoberflächen von den im Labor oder an der Baustelle hergestellten Betonen geklebt.

Die Rohdichte, die Druckfestigkeit und die Porosität des Betons der Betonplatten wurden an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 150 mm aus der Mitte der Betonplatte bestimmt. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12504. Die Rohdichte wurde aus der Masse und den Abmessungen der Proben unmittelbar vor der Prüfung der Druckfestigkeit ermittelt. Die Porosität im Porenbereich von ca. 0,004 µm bis 6 µm wurde mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (Hg-Porosität) gemäß DIN 66133 bestimmt.

The water secretion and tendency to sedimentation of the concretes was regulated by carefully controlled variation of the fine mortar composition. The A16/B16 grading curve, with and without the 0/0.125 particle size group, was used for this purpose. Variations were also made in the 0/2 size group. Table 2 contains the data for the grading curves used. The influence of fluctuations in water content, e.g. due to varying moisture content of the aggregate, was examined during carefully controlled variation of the water content.

3.2.2 Investigations

The consistency on the flow table as specified in DIN EN 12350-5, the air content as specified in DIN EN 12350-7, the fresh concrete bulk density as specified in DIN EN 12350-6 and the water secretion measured by the bucket method specified in [11] were determined for all the concretes.

The tendency to segregate and the mix stability were also assessed visually by examining the pat of concrete on the flow table after determining the consistency of the fresh concrete. The sedimentation behaviour of the concretes was also assessed visually, for which the hardened concrete specimens were each removed from the bucket. The concretes were notched with a saw in the dry state and split. The tendency to segregation was assessed from the split faces.

Information on the applicability to practical situations was obtained in the laboratory with prismatic specimens with an area of 50 cm x 50 cm and a depth of 20 cm [13]. The quantity of water secreted from the specimens was determined following the procedure in the DBV instruction sheet [11].

The knead-bag method specified in DIN 18218 was used for determining the setting time of the concrete. The penetration resistance specified in [1] was also used for determining the setting behaviour of the fresh concrete. In this method the force required for a metal cone (circular 20° cone) to penetrate into the surface of the fresh concrete up to a depth of 20 mm is measured with a load cell.

The following hardened concrete properties were determined: bulk density, compressive strength and surface tensile strength of the concrete. The compressive strength of the concrete was measured on cubes with an edge length of 150 mm as specified in DIN EN 12390-3. The specimens were produced and stored as specified in DIN EN 12390-2, Amendment 1. The bulk density of the concrete was determined from the mass and the dimensions of the cube immediately before the compressive strength test. The surface tensile strength of the concrete was determined from the force needed to pull off a circular or square test punch using the procedure in DIN EN 1542. The test punch was glued to the surface of the concretes produced in the laboratory or on the construction site.

The bulk density, the compressive strength and the porosity of the concrete in the concrete slabs were determined on drill cores with a diameter of 150 mm taken from the centres of the concrete slabs. The compressive strength was tested as specified in DIN EN 12504. The bulk density of the concrete was determined from the mass and dimensions of the sample immediately before the compressive strength test. The porosity in the pore size range from about 0.004 µm to 6 µm was determined by mercury intrusion porosimetry (Hg porosity) as specified in DIN 66133.

The time-dependent water content in the concrete cross-section at different heights was determined by a few specific trials. The water content of the concrete was determined by drying in a drying cabinet at 105 °C and by the microwave method [11]. Three buckets were produced as specified in [11] to obtain the specimens. Measurements to determine the water secretion were carried out first in these three buckets. The measurements ended after 2 h and 6 h. After removal of the water that had been drawn off, samples were taken from any two of the buckets to determine the water content in the concrete. In the third bucket the water that had been drawn off after the 6 h measurement was returned to the concrete and the bucket was covered with film and stored at about 20 °C

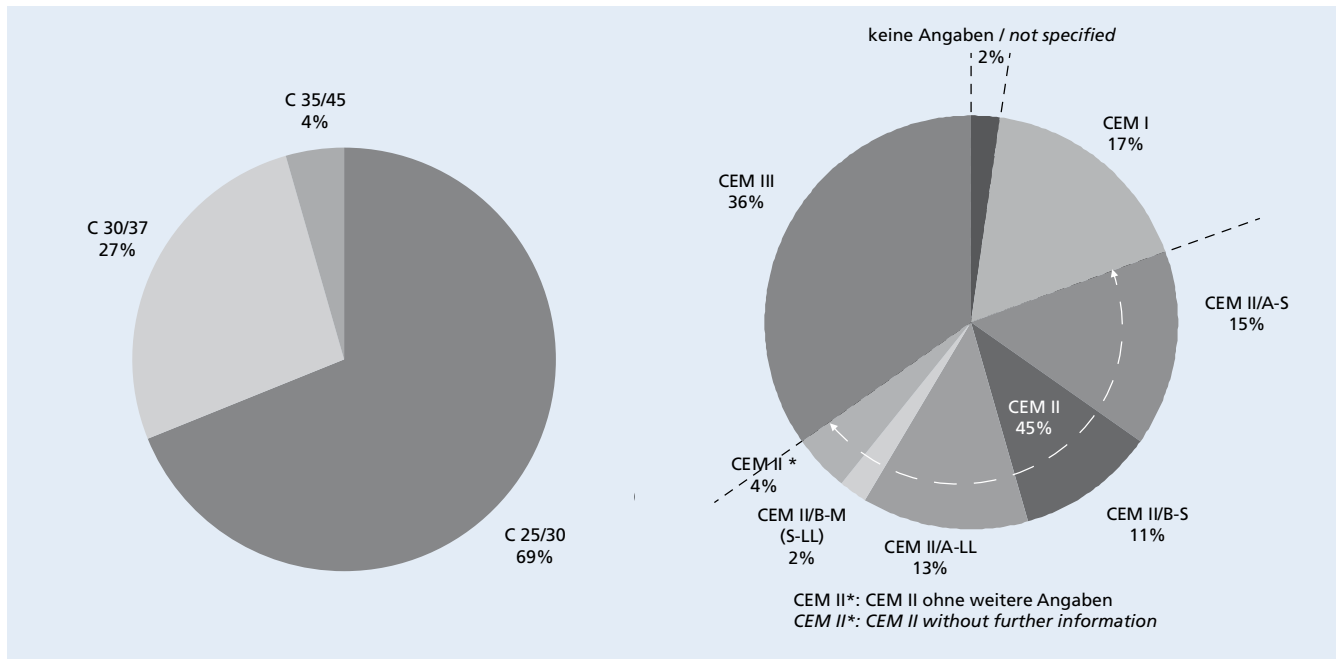


Bild 1: Daten zur Betonzusammensetzung (Auswertung basiert auf einer Stichprobe von 45 deutschen Baustellen im Jahr 2010)
Figure 1: Data on concrete compositions (evaluation based on a random sample of 45 German construction sites in 2010)

Mit einigen gezielten Versuchen wurde der zeitabhängige Wassergehalt im Betonquerschnitt über die Höhe bestimmt. Der Wassergehalt des Betons wurde durch Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C sowie mit dem Mikrowellenverfahren [11] bestimmt. Zur Gewinnung der Prüfkörper wurden drei Eimer nach [11] hergestellt. In diesen drei Eimern wurden zunächst Messungen zur Bestimmung des Wasserabsonders durchgeföhrt. Die Messung endete nach 2 h bzw. nach 6 h. Nach Entfernen des abgesaugten Wassers wurden aus jeweils zwei Eimern Proben zur Bestimmung des Wassergehalts im Beton entnommen. In jeweils einem Eimer wurde das abgesaugte Wasser nach der 6-h-Messung wieder auf den Beton zurückgegeben und der Eimer wurde bis zum nächsten Tag abgedeckt mit Folie bei rd. 20 °C gelagert. Der erhärtete Beton wurde aus dem Eimer entnommen, angesägt und dann gespalten.

Die Laboruntersuchungen wurden im Laborklima bei rd. 20 °C durchgeföhrt. Die Betonzusammensetzungen, die verwendeten Prüfverfahren sowie die bestimmten Frischbetoneigenschaften wurden ausführlich in [13] dargestellt.

3.3 Baustellenuntersuchungen an optimiertem Beton

Die Herstellung einer größeren Bodenfläche fand am 28.02.2012 im Institut für Baustoffprüfung und Fußbodenforschung (IBF), Troisdorf, statt. In einem Transportbetonwerk wurden 16 m³ Beton mit 340 kg/m³ CEM II/B-S, einem Wasserzementwert von w/z = 0,50 und dem Betonverflüssiger BV hergestellt. Die Lieferung zur Baustelle erfolgte in zwei Chargen. Bei Ankunft des Betons wurde die angestrebte Zielkonsistenz (Ausbreitmaß) von rd. 540 mm mit dem Fließmittel des Typs MNS eingestellt. Die Lufttemperatur in der Halle betrug rd. 17 °C.

Die Frischbetoneigenschaften, das Erstarren des Betons und die Festbetoneigenschaften wurden wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben ermittelt. An Bohrkernen aus der Mitte der Versuchsflächen wurden die Rohdichte, die Druckfestigkeit und die Porosität des Betons bestimmt.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der praxisbezogenen Datensammlung zur Betonzusammensetzung deutscher Baustellen und der baustellenbegleitenden Untersuchungen

In der Datensammlung und bei den begleiteten Baustellen wurden überwiegend Betonböden innenliegender Hallenflächen er-

until the next day. The hardened concrete was removed from the bucket, notched with a saw and then split.

The laboratory investigations were carried out at about 20 °C. The concrete compositions, the test methods used and the fresh concrete properties measured have been reported in detail in [13].

3.3 Construction site investigations on optimized concrete

A large floor area was produced on 28.02.2012 at the IBF (Institute for Building Concretes Testing and Flooring Research), Troisdorf. 16 m³ concrete were produced in a ready-mixed concrete plant with 340 kg/m³ CEM II/B-S cement, a water/cement ratio w/c = 0.50 and a plasticizer. The concrete was delivered to the construction site in two batches. When the concrete arrived the consistency (flow table spread) was adjusted to the desired value of about 540 mm using an MNS superplasticizer. The air temperature in the hall was about 17 °C.

The fresh concrete properties, the setting of the concrete and the hardened concrete properties were determined as described in Section 3.2.2. The bulk density, compressive strength and porosity of the concrete were determined on drill cores taken from the centre of the test area.

4 Results

4.1 Results from the data collection on concrete compositions obtained under practical conditions from German construction sites and the investigations carried out at the construction sites

The data collection and the monitored construction sites mainly involved concrete floors in covered areas. The concretes were delivered to the construction sites as ready-mixed concrete. As a rule, concretes of the C25/30 or C30/37 strength classes containing CEM II and CEM III cements of the 32,5 N and 42,5 N strength classes were used to produce the covered areas (Fig. 1). The cement content lay between 320 kg/m³ and 340 kg/m³, and the water/cement ratio lay between 0.44 and 0.55. The aggregates consisted mainly of 0/16 or 0/32 gravel, but in some cases of 0/22 chippings. From the information in the data collection on the construction of the concrete slabs, the concrete composition and the production it can be assumed that this corresponds to the information in the literature on concrete floors, e.g. in [3, 5, 7]. The fresh concrete temperatures lay between 10 °C and 25 °C.

fasst. Die Betone wurden als Transportbeton auf die Baustellen geliefert. In der Regel wurden Betone der Festigkeitsklasse C25/30 bzw. C30/37 mit CEM II- und CEM III-Zementen der Zementfestigkeitsklassen 32,5 N und 42,5 N zur Herstellung der Hallenflächen verwendet (Bild 1). Der Zementgehalt lag zwischen 320 kg/m³ und 340 kg/m³; der Wasserzementwert zwischen 0,44 und 0,55. Die Gesteinskörnungen bestanden überwiegend aus Kies 0/16 bzw. 0/32, teilweise aus Splitt 0/22. Die Angaben in der Datensammlung zum Aufbau der Betonplatten, Betonzusammensetzung und Herstellung lassen vermuten, dass diese den Literaturangaben für Betonböden, z.B. in [3, 5, 7] entsprachen. Die Frischbetontemperaturen betrugen zwischen 10 °C und 25 °C.

Alle Betone wurden mit Zusatzmitteln (BV oder FM) auf die an der Baustelle geforderte Konsistenz eingestellt. Die Betone wurden i. d. R. in der Konsistenzklasse F4 eingebaut, und das Wasserabsondern wurde mit qualitativen Angaben der ausführenden Unternehmen bewertet (Bild 2). Im Zuge der Dokumentation der Baustellen wurde festgestellt, dass eine max. abgesonderte Wassermenge von rd. 4 kg/m³ gemessen im Eimerverfahren nach [11] der qualitativen Aussage „gering“ entsprach.

Die Datensammlung lieferte zudem Erkenntnisse zum Zeitfenster, innerhalb dessen üblicherweise das Glätten der Betonoberfläche stattfindet bzw. eine Verschleißschicht (Hartstoffestrich, Hartstoffestrich) aufgebracht werden kann. Die Liegezeit vom Einbau des Betons bis zum Beginn der Bearbeitung der Oberfläche wird durch die Luft- und Frischbetontemperatur beeinflusst. Steigende Luft- und Frischbetontemperaturen verkürzen i. d. R. den Zeitraum bis zum möglichen Beginn der Bearbeitung der Oberfläche. Eine eindeutige Abhängigkeit der Bearbeitungszeiten von der Zementart, vom Wasserzementwert oder vom Ausbreitmaß wurde nicht gefunden.

Bild 3 zeigt eine Korrelation zwischen dem nach dem Eimerverfahren [11] festgestellten Ende des Wasserabsonderns des Betons und dem Zeitpunkt, an dem mit der Oberflächenbearbeitung des Betons (Abscheiben der Betonoberfläche) begonnen wurde. Der Zeitpunkt des Beginns der Oberflächenbehandlung wurde mittels der so genannten „Stiefelprobe“ ermittelt. Mit der Stiefelprobe wird in der Praxis die Trittfestigkeit des Betonbodens durch den Bearbeiter subjektiv beurteilt. Die Oberflächenbearbeitung begann etwa 1 h bis 2,5 h nach Erreichen der maximal

All the concretes were adjusted to the required consistency at the construction site with admixtures (plasticizers or superplasticizers). As a rule the concretes were in the F4 consistency class when they were placed and the water secretion was evaluated on the basis of qualitative information from the contracting companies (Fig. 2). During the documentation of the construction sites it was established that a maximum quantity of secreted water of about 4 kg/m³ measured by the bucket method described in [11] corresponded to the qualitative statement “slight”.

The data collection also provided information about the time window within which the smoothing of the concrete surface usually takes place or a wearing layer (granolithic surfacing, granolithic screed) can be applied. The resting time from the placement of the concrete to the start of processing the surface is influenced by the temperatures of the air and the fresh concrete. Increasing air and fresh concrete temperatures usually shorten the time before it is possible to start processing the surface. No clear dependence of the processing times on the type of cement, the water/cement ratio or the flow table spread was found.

Fig. 3 shows the correlation between the end of water secretion from the concrete determined by the bucket method [11] and the time at which the treatment of the concrete surface (striking off the concrete surface) was started. The moment when the surface treatment started was determined by the “boot test” by which in practice the tread resistance of the concrete floor is assessed subjectively by the operator. The surface treatment started about 1 h to 2.5 h after the quantity of water secreted in the bucket had reached a maximum. No clear correlation was found between the setting time of the concrete established by the knead-bag method and the time when the surface treatment began. Relatively large fluctuations between the individual values were found in the penetration resistance test (see Section 3.2.2) by the penetration needle method [1]. The average penetration force determined as described in [1] when the surface treatment of the concrete started (striking off the concrete surface) lay between about 50 N and 130 N.

Evaluation of the data and comparison with the concrete compositions given in the literature for concrete industrial floors provided the boundary conditions for the concrete compositions that were used for the laboratory investigations.

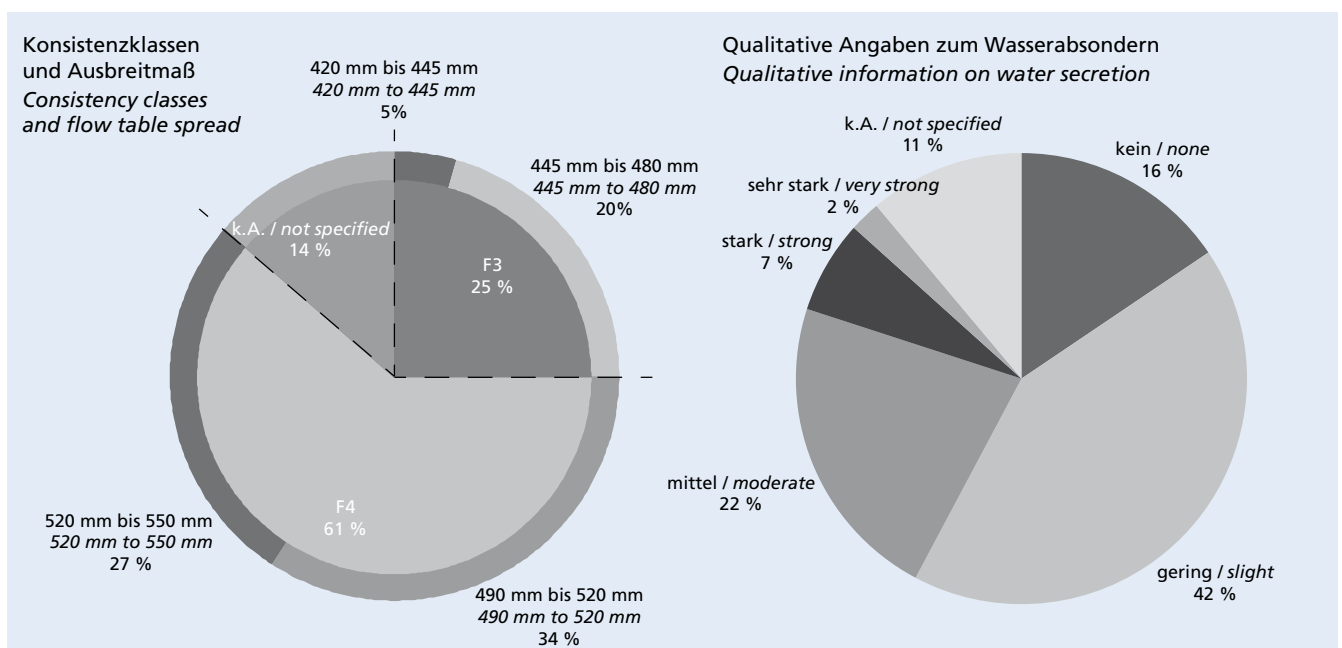


Bild 2: Daten zu Frischbetoneigenschaften (Auswertung basiert auf einer Stichprobe von 45 deutschen Baustellen im Jahr 2010; k. A.: keine Angaben)

Figure 2: Data on fresh concrete properties (evaluation based on a random sample of 45 German construction sites in 2010; k.A.: not specified)

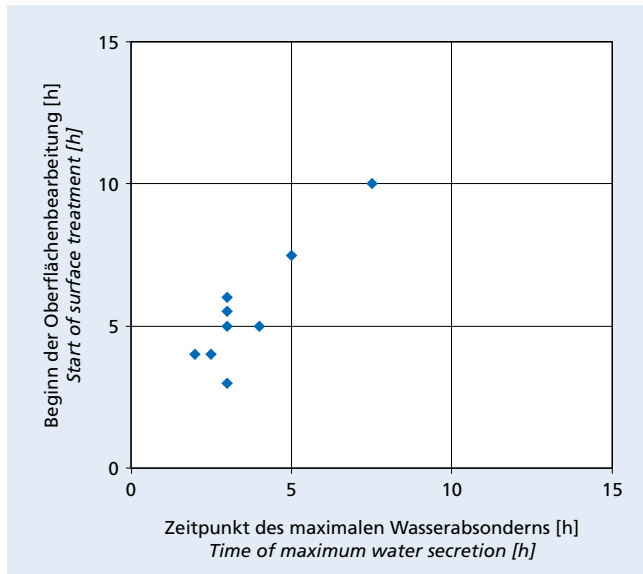


Bild 3: Zeitpunkt des max. Wasserabsonderns nach [11] und Beginn der Oberflächenbearbeitung. Auswertung basiert auf einer Basisstichprobe von neun deutschen überwachten Baustellen im Jahr 2010

Figure 3: Time of maximum water secretion according to [11] and start of surface treatment. Evaluation based on a basic random sample of nine monitored German construction sites in 2010

abgesonderten Wassermenge im Eimer. Eine eindeutige Korrelation zwischen dem mit dem Knetbeutelverfahren festgestellten Erstarrungszeitpunkt des Betons und dem Zeitpunkt des Beginns der Oberflächenbearbeitung, wurde nicht festgestellt. Bei der Prüfung des Eindringwiderstandes (s. Abschnitt 3.2.2) mit dem Penetrationsnadel-Verfahren [1] wurden relativ große Schwankungen zwischen den Einzelwerten festgestellt. Die zum Zeitpunkt des Beginns der Oberflächenbearbeitung des Betons (Abscheiben der Betonoberfläche) im Mittel ermittelte Eindringkraft gemäß [1] lag zwischen etwa 50 N bis 130 N.

Die Auswertung der Daten und der Vergleich mit den in der Literatur angegebenen Betonzusammensetzungen für Industriebetonböden lieferten die Laborbedingungen für die Betonzusammensetzungen, die für die Laboruntersuchungen verwendet wurden.

4.2 Ergebnisse der labortechnischen Untersuchungen

4.2.1 Frischbetoneigenschaften

Bei der Einstellung der Zielkonsistenz von (540 ± 20) mm im Ausbreitversuch mit dem Betonverflüssiger und den Fließmitteln wurde festgestellt, dass die Ausbreitmaße mit einer schrittweisen Dosierung geringer waren als mit einer einmaligen Zusatzmitteldosierung. Eine jeweilige über den Sättigungspunkt des Zusatzmittels hinausgehende Dosierung führte zu keiner weiteren Verflüssigung, wohl aber zu Entmischungserscheinungen. Diese Entmischungserscheinungen zeigten sich in Form von Wasser- oder Leimrandbildung im Ausbreitversuch sowohl mit dem Zusatzmittel MNS als auch mit dem PCE „Typ Fertigteil“. Die Leimrandbildung nahm mit der Zeit (bei der späteren Bestimmung des Ausbreitmaßes) z.T. vollständig ab. Entmischungserscheinungen zeigten die Betone mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R mit $2540 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine und mit dem CEM II/BS 42,5 N mit $4540 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine bei Verwendung des MNS und des PCE. Durch Erhöhung des Mehlkorngehalts traten keine Wasser- oder Zementleimrandbildungen mehr auf (Bild 4). Hierzu wurde der Siebdurchgang der Sieblinie S1 (A16/B16) im Bereich der Korngruppe 0/0,125 von 0,4 Vol.-% auf 3,1 Vol.-% erhöht. Diese Betone wurden dann mit der Sieblinie S2 hergestellt (Tafel 2).

Die maximal abgesonderten Wassermengen lagen zwischen rd. $2,0 \text{ kg}/\text{m}^3$ und $4,5 \text{ kg}/\text{m}^3$. Mit dem feiner gemahlten Portland-

4.2 Results of the laboratory investigations

4.2.1 Fresh concrete properties

During the adjustment to the target consistency of (540 ± 20) mm in the flow table spread test using plasticizers and superplasticizers it was established that the flow table spreads were smaller with stepped additions than with a single addition of admixture. An addition level in excess of the saturation point of the particular admixture did not have any further plasticizing effect but did cause segregation phenomena. These segregation phenomena became apparent through the formation of water or paste borders in the flow table test both with the MNS admixture and with the “precast element” type of PCE admixture. The formation of paste borders decreased, in some cases completely, with time (with later determination of the flow table spread). The concretes made with CEM I 32,5 R Portland cement ($2540 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine) and with CEM II/BS 42,5 N cement ($4540 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine) exhibited segregation phenomena when the MNS and PCE admixtures were used. Water and cement paste borders no longer appeared when the fines content was increased (Fig. 4). The screen undersize of the S1 grading curve (A16/B16) in the 0/0.125 particle size range was increased from 0.4 vol. % to 3.1 vol. %. These concretes were then produced with the S2 grading curve (Table 2).

The maximum quantity of secreted water lay between about $2.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ and $4.5 \text{ kg}/\text{m}^3$. With the finely ground CEM I 32,5 R Portland cement ($3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine) and PCE the quantity of secreted water rose to about $11 \text{ kg}/\text{m}^3$ when the PCE was added by mixing it with the mixing water. For the same concrete composition the concretes made with CEM II and CEM III/A cements usually exhibited less tendency to secreting than the concretes made with CEM I Portland cement. This means that the quantity of secreted water sometimes varied substantially depending on the combination of concrete constituents. Table 3 summarizes the results of the investigations. These and other influencing factors, such as the type and addition level of the admixtures, the water/cement ratios, the mixing process and the type of compaction as well as the geometry and temperature are shown in [13].

4.2.2 Stability of the concrete

The stability of the concrete was initially assessed in the fresh state. Any water or cement paste borders on the concrete in the flow table spread test were assessed visually. Concretes with similar flow table spreads exhibited borders with strongly marked differences. The borders of the extended part of concrete and the quantities of secreted water measured in the bucket fell with increasing fines content and with decreasing water content or lower addition level of admixture [13]. The results showed that the quantity of water secreted in the bucket test as specified in [11] is not in itself sufficient for assessing the stability of the concrete. Fig. 5 shows that more than twice as much secreted water does not lead to significantly increased segregation as evaluated by the flow table spread test. Fig. 5 also shows the influence of the fines content on the fresh concrete properties at constant admixture addition level. This is confirmed by the results with other concrete compositions. Using the example of concrete made with CEM I 32,5 R cement and $w/c = 0.60$ without superplasticizer, Fig. 6 shows that a stable extended part of concrete was obtained on the flow table in spite of a maximum quantity of secreted water of about $30 \text{ kg}/\text{m}^3$.

However, the water secretion can sometimes result in different water contents over the concrete cross-section. Fig. 7 (left), for example, shows the water content of two concretes with a water/cement ratio $w/c = 0.53$. Fresh concrete was taken from the top and bottom 2 cm and dried to constant weight in a drying cabinet at 105°C or in a microwave. These investigations were carried out with specimens taken from the bucket (see Section 3.2.2). The water content of the concrete was determined over the height of the test piece.

Fig. 7 (right) shows the fresh concrete properties of the concretes. The fresh concrete properties at a water/cement ratio $w/c = 0.50$ are also shown for comparison. The concretes with a $w/c = 0.50$ showed a significant decrease in water secretion when compared with those with a $w/c = 0.53$. The concretes with $w/c = 0.53$

zement CEM I 32,5 R (3300 cm²/g nach Blaine) und PCE stieg die Blutwassermenge bei Zugabe des PCE im Zugabewasser gemischt auf rd. 11 kg/m³. Die Betone mit den CEM II- und CEM III/A-Zementen zeigten bei gleicher Betonzusammensetzung in der Regel eine geringere Blutneigung als die Betone mit Portlandzement CEM I. Die Blutwassermenge variierte somit z.T. erheblich in Abhängigkeit der Kombination der Betonausgangsstoffe. Tafel 3 enthält die Übersicht der Untersuchungsergebnisse. Diese und andere Einflüsse wie die Dosierung und Art des Zusatzmittels, die Wasserzementwerte, der Mischvorgang, die Verdichtungsart sowie die Geometrie und die Temperatur sind in [13] dargestellt.

4.2.2 Stabilität des Betons

Die Stabilität des Betons wurde zuerst im frischen Zustand beurteilt. Hierfür wurden die ggf. entstandenen Wasser- oder Zementleimränder des Betons auf dem Ausbreittisch im Ausbreitversuch visuell bewertet. Die Betone zeigten bei ähnlichen Ausbreitmaßen unterschiedlich stark ausgeprägte Ränder. Die Ränder des Ausbreitkuchens und die abgesonderten Wassermengen gemessen im Eimer verringerten sich mit zunehmendem Mehlkorngesamt und bei abnehmendem Wassergehalt bzw. geringerer Zusatzmitteldosierung [13]. Die Ergebnisse zeigten, dass die abgesonderte Wassermenge mit dem Eimerverfahren nach [11] alleine zur Beurteilung der Stabilität des Betons nicht ausreicht. Bild 5 zeigt, dass eine mehr als verdoppelte abgesonderte Wassermenge nicht zu einer deutlich verstärkten Entmischung, bewertet nach dem Ausbreitversuch, führte. Bild 5 zeigt auch den Einfluss des

showed a similar water content in the top 2 cm. In the bottom 2 cm the water content of the concrete with the higher quantity of secreted water of 23 kg/m³ was, however, lower than for the concrete with a quantity of secreted water of 17 kg/m³. Immediately after production the water content of the fresh concretes was determined as 7.7 mass %. The water content determined by drying at 105 °C was, as expected, somewhat lower than with the microwave method specified in [11].

From the results it can be assumed that the ratio between the upper and lower water contents (W_{top}/W_{bottom}) is a measure of the water content gradient and is therefore a measure of the cross-sectional homogeneity of the concrete. Fig. 8 (left) shows that the water content gradient was heavily dependent on the water content of the concrete. Fig. 8 (right) shows that up to 6 h the gradient increases with increasing w/c ratio. At 24 h the upper and lower water contents come closer together for the two w/c ratios due to advancing hydration.

The concretes were taken from the bucket at 24 h, notched with a saw and then split. The sectional view provides information about segregation and deficient stability through the formation of mortar layers on the surface of the concrete (Fig. 9).

Samples were taken from the top and bottom 20 mm of the test piece to determine the porosity by mercury intrusion porosimetry (see Fig. 9). There was practically no difference in the porosity values of the mortar matrix in the lower part of the samples for different water/cement ratios. The values were about 12 vol. %. Higher values of about 16 vol. % for w/c = 0.50 and about 17 vol. % for w/c

Portlandzement CEM I 32,5 R (2540 cm²/g nach Blaine);
z = 340 kg/m³; w/z = 0,50; Zusatzmittel 1,6 M.% MNS
CEM I 32,5 R Portland cement (2540 cm²/g Blaine); c = 340 kg/m³;
w/c = 0.50; admixture 1.6 mass % MNS



Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N (4540 cm²/g nach Blaine)
z = 340 kg/m³; w/z = 0,50; Zusatzmittel 1,1 M.% PCE-A
CEM II/B-S 42,5 N Portland-slag cement (4540 cm²/g Blaine);
c = 340 kg/m³; w/c = 0.50; admixture 1.1 mass % PCE-A

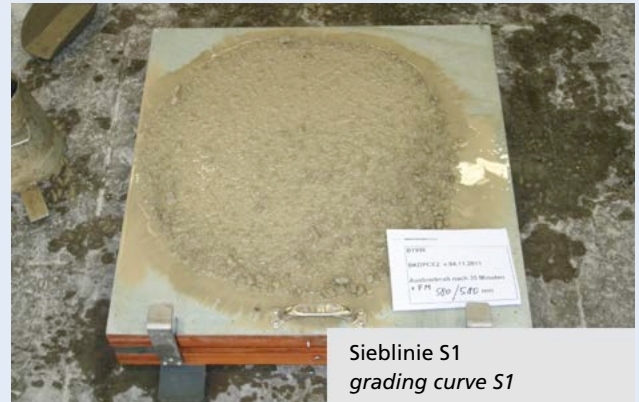


Bild 4: Einfluss der Gesteinskörnungszusammensetzung, insbesondere der Korngruppe 0/0,125, auf die Wasser- und Zementleimrandbildung des Betons im Ausbreitversuch

Figure 4: Influence of the aggregate particle size composition, in particular of the 0/0.125 size group, on the formation of water and cement paste borders around the concrete in the flow table test

Tafel 3: Frischbetoneigenschaften der Betone der labortechnischen Untersuchungen. Betone mit $z = 340 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$
Table 3: Properties of the fresh concrete in the laboratory investigations. Concretes with $c = 340 \text{ kg/m}^3$; $w/c = 0.50$

Zement Cement	Sieblinie Grading curve	Zusatzmittel Admixture		a_{35} [cm]	max. abgesonderte Wassermenge [kg/m ³] Max. water secretion [kg/m ³]	Optische Beurteilung des Betons im Ausbreitversuch Visual assessment of the concrete in the flow-table test
		Art Type	Menge [M.-% v.z.] Quantity [mass % w.r.t. c]			
CEM I 32,5 R mit einer Mahl- feinheit von 2540 cm ² /g nach Blaine CEM I 32,5 R with a fineness of 2540 cm ² /g Blaine	S1	MNS	1,6	51	n.b.	Leimrandbildung formation of paste borders
	S2			52		keine Auffälligkeit no abnormality
	S1	PCE-A	0,6	52		Leimrandbildung formation of paste borders
CEM I 32,5 R mit einer Mahl- feinheit von 3300 cm ² /g nach Blaine CEM I 32,5 R with a fineness of 3300 cm ² /g Blaine	S1	MNS	1,4	55	4,6	keine Auffälligkeit no abnormality
	S2	PCE-A*)	0,7	50	11,2	keine Auffälligkeit no abnormality
CEM II/A-LL 32,5 R	S1	MNS	1,4	56	1,9	keine Auffälligkeit no abnormality
		PCE-A*)	0,8	54	4,1	keine Auffälligkeit no abnormality
CEM II/B-S 42,5 N	S1	MNS	3,4	54	n.b.	Leimrandbildung formation of paste borders
		PCE-A	1,1	58		
	S2	MNS	2,2	58		Leimrandbildung formation of paste borders
		PCE-A	1,1	56		keine Auffälligkeit no abnormality
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	S1	MNS	2,2	55	n.b.	keine Auffälligkeit no abnormality
		PCE-A*)	1,3	60	n.b.	keine Auffälligkeit no abnormality
CEM III/A 42,5 N	S1	MNS	1,2	52	4,6	keine Auffälligkeit no abnormality
		PCE-A	0,4	54	4,9	keine Auffälligkeit no abnormality
		PCE-A*)	0,6	52	1,6	keine Auffälligkeit no abnormality

*) Das PCE-A (PCE „Typ Fertigteil“) wurde im Zugabewasser gemischt zugegeben; n.b.: nicht bestimmt

*) The PCE-A (“prefabricated element” PCE) was added by mixing it with the mixing water; n.b.: not determined

Mehlkorngehalts bei konstanter Zusatzmitteldosierung auf die Frischbetoneigenschaften. Die Ergebnisse weiterer Betonzusammensetzungen bestätigen dies. Bild 6 zeigt am Beispiel des Betons mit CEM I 32,5 R, $w/z = 0,60$ ohne Fließmittel, dass sich trotz einer maximal abgesonderten Wassermenge von rd. 30 kg/m^3 ein stabiler „Ausbreitkuchen“ auf dem Ausbreittisch einstellte.

Durch das Wasserabsondern kann sich jedoch ein z. T. unterschiedlicher Wassergehalt im Betonquerschnitt einstellen. Bild 7 links zeigt beispielhaft den Wassergehalt von zwei Betonen mit dem Wasserzementwert von $w/z = 0,53$. Hierfür wurde Frischbeton aus den oberen bzw. unteren 2 cm entnommen und im Trockenschrank bei 105°C oder in der Mikrowelle bis zur Massekonstanz getrocknet. Diese Untersuchungen wurden mit aus dem Eimer gewonnenen Prüfkörpern durchgeführt (s. Abschnitt 3.2.2). Der Wassergehalt des Betons wurde über die Höhe der Prüfkörper ermittelt.

Bild 7 rechts zeigt die Frischbetoneigenschaften der Betone. Vergleichend dazu sind auch die Frischbetoneigenschaften bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ dargestellt. Die Betone

= 0.52 and $w/c = 0.54$ were obtained in the area near the surface. The porosity of the concrete with $w/c = 0.54$ was determined on sample concrete from the region of the mortar-rich surface (see Fig. 9, right). Segregation phenomena therefore led to an increase in the proportion of fines, in the water content and in the porosity at the concrete surface. Immediately below the fines-rich layer at the surface the porosity was about 12 vol. %.

Visual assessment of the hardened concrete in specimens from the buckets and drill cores showed that a changed concrete composition can occur over the cross-section due to water secretion in spite of maintaining the target values for quantity of secreted water and consistency, and an accumulation of mortar may occur at the surface.

Extended preliminary tests with a corresponding hardened concrete trial would therefore be needed to obtain information about the accumulation of fines at the surface.



Ausbreitkuchen des Betons mit 370 kg/m³ Mehlkorngelalt (Sieblinie S3)
Concrete flow table pat containing 370 kg/m³ flour-fines (grading curve S3)



Ausbreitkuchen des Betons mit 380 kg/m³ Mehlkorngelalt (Sieblinie S5)
Concrete flow table pat containing 380 kg/m³ flour-fines (grading curve S5)

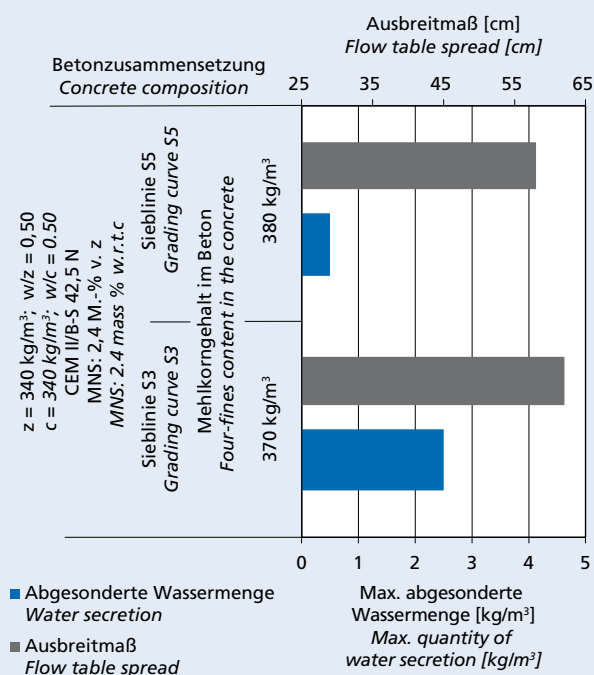


Bild 5: Einfluss des Mehlkorngelalts der Sieblinie des Betons auf die Stabilität des Betons im Ausbreitversuch (links) und auf das Ausbreitmaß und die abgesonderte Wassermenge (rechts)

Figure 5: Influence of the flour-fines content of the concrete grading curve on the stability of the concrete in the flow table spread test (left) and on the flow table spread and quantity of water secretion (right)

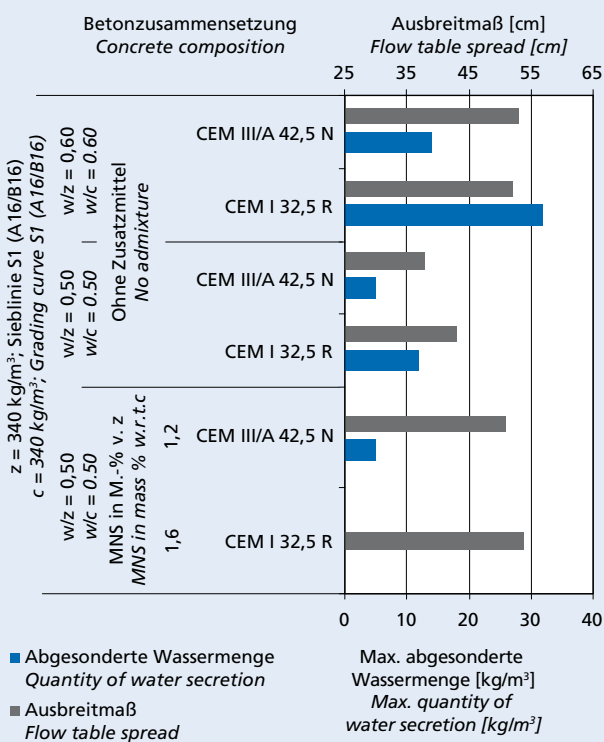
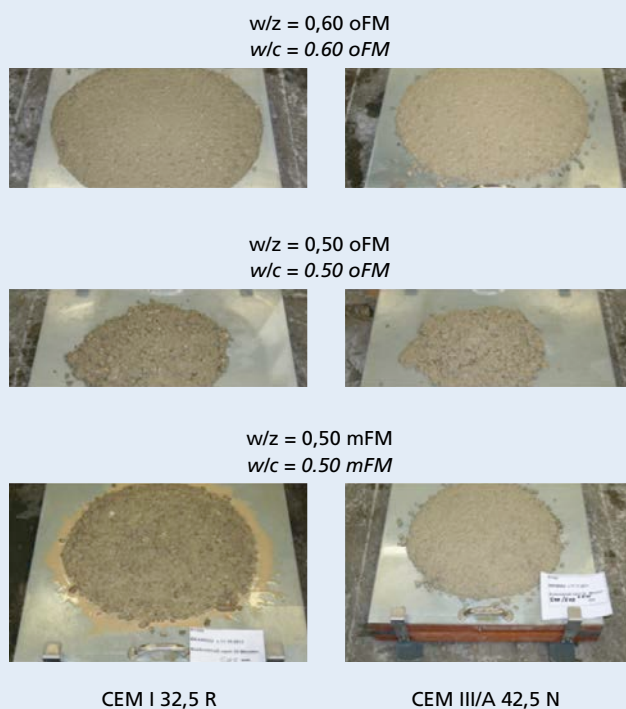


Bild 6: Einfluss des Wasserzementwerts und der Fließmitteldosierung auf die Stabilität des Betons im Ausbreitversuch (links) und auf das Ausbreitmaß und die abgesonderte Wassermenge (rechts). oFM: ohne Fließmittel; mFM: mit Fließmittel. Bei dem Beton mit CEM I 32,5 R und mFM wurde die abgesonderte Wassermenge nicht bestimmt.

Figure 6: Influence of the water/cement ratio and the superplasticizer addition level on the stability of the concrete in the flow table test (left) and on the flow table spread and the quantity of water secretion (right). oFM: no superplasticizer; mFM: with superplasticizer. The water secretion was not determined for the concrete made with CEM I 32,5 R and mFM

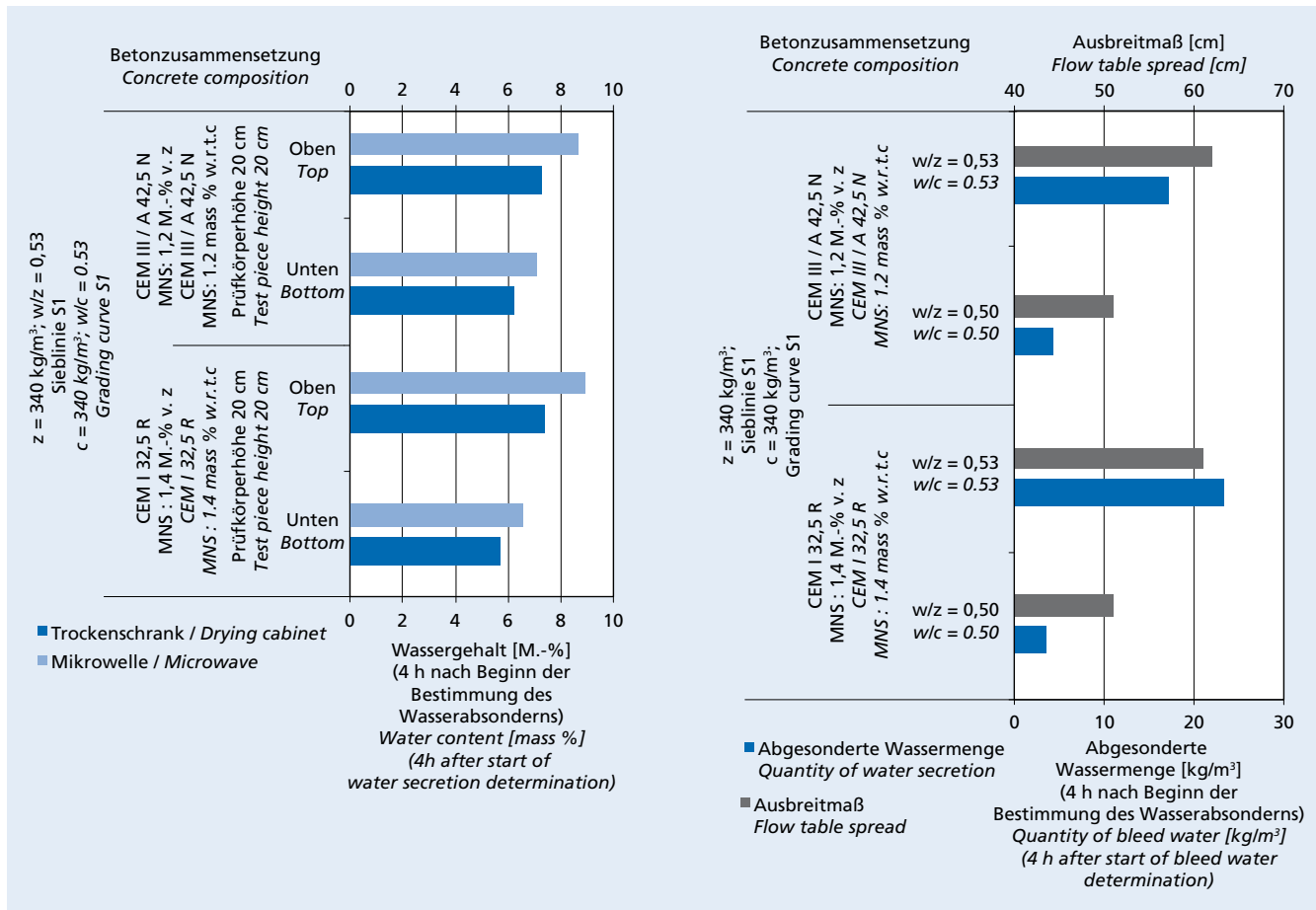


Bild 7: Verteilung des Wassergehalts im Querschnitt am Beispiel der Betone mit Portlandzement CEM I 32,5 R und CEM III/A 42,5 N (links) und Ausbreitmaß und abgesonderte Wassermenge (rechts)

Figure 7: Distribution of the water content over the cross-section using the example of concretes made with Portland cement CEM I 32,5 R and CEM III/A 42,5 N (left), and flow table spread and quantity of water secretion (right)

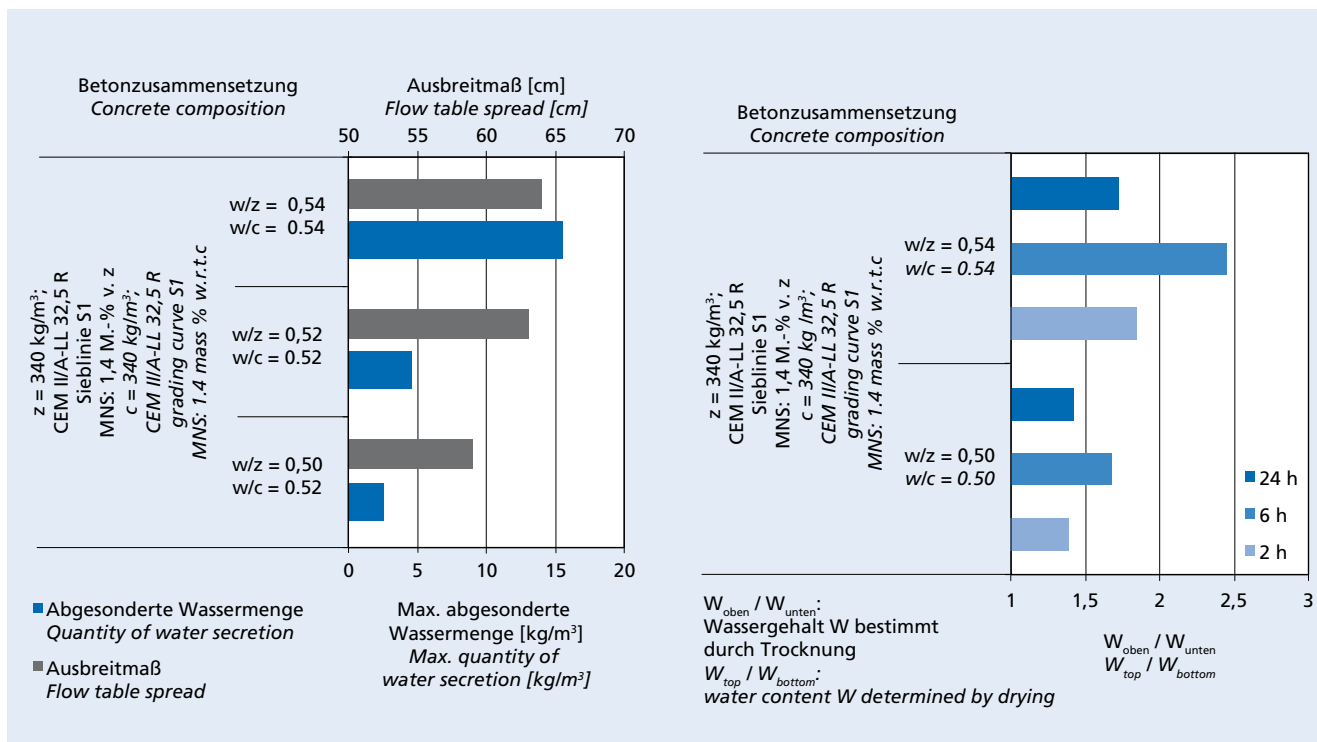


Bild 8: Frischbetoneigenschaften und Wassergehalt-Gradienten im Querschnitt

Figure 8: Fresh concrete properties and water content gradients over the cross-section



w/z = 0,50
w/c = 0.50



w/z = 0,54
w/c = 0.54

Bild 9: Prüfkörper zur Beurteilung der Stabilität im erhärteten Zustand und zur Bestimmung der Porosität im Alter von 28 Tagen. z = 340 kg/m³; Zement CEM II/A-LL 32,5 R; MNS: 1,4 M.-% v.z.; Sieblinie S1

Figure 9: Test pieces for assessing the stability in the hardened state and for determining the porosity at the age of 28 days. c = 340 kg/m³; cement CEM II/A-LL 32,5 R; MNS; 1.4 mass % w.r.t. c; grading curve S1

mit einem w/z = 0,50 zeigten eine deutliche Abnahme des Wasserabsondersens im Vergleich zu dem w/z = 0,53. Die Betone mit dem Wasserzementwert von w/z = 0,53 zeigten in den oberen 2 cm einen ähnlichen Wassergehalt. In den unteren 2 cm war der Wassergehalt des Betons mit der höheren abgesonderten Wassermenge von 23 kg/m³ allerdings niedriger als beim Beton mit einer abgesonderten Wassermenge von 17 kg/m³. Direkt nach der Herstellung wurde der Wassergehalt der Frischbetone mit 7,7 M.-% bestimmt. Der Wassergehalt war durch Trocknung bei 105 °C erwartungsgemäß etwas kleiner als im Mikrowellen-Verfahren nach [11].

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass das Verhältnis zwischen dem oberen und unteren Wassergehalt ($W_{\text{oben}}/W_{\text{unten}}$) ein Maß für einen Wassergehalt-Gradienten ist und somit ein Maß für die Homogenität des Betons im Querschnitt darstellt. Bild 8 links zeigt, dass der Wassergehalts-Gradient stark vom Wassergehalt des Betons abhängig war. Bild 8 rechts zeigt, dass der Gradient bis 6 h mit zunehmendem w/z-Wert zunimmt. Im Alter von 24 h, bedingt durch den Hydrationsfortschritt, nähern sich die Wassergehalte oben und unten bei beiden w/z-Werten an.

Die Betone wurden im Alter von 24 Stunden aus dem Eimer entnommen, angesägt und dann gespalten. Das Schnitt- bzw. Spaltbild gibt Hinweise auf Entmischungen bzw. die mangelnde Stabilität durch Bildung von Mörtelschichten an der Betonoberfläche (Bild 9).

Zur Bestimmung der Porosität mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurden Proben aus den obersten bzw. untersten 20 mm der Prüfkörper entnommen (s. Bild 9). Die Porositätswerte der Mörtelmatrix im unteren Bereich der Proben unterschieden sich auch bei unterschiedlichen Wasserzementwerten praktisch nicht. Die Werte lagen bei rd. 12 Vol.-%. Höhere Werte ergaben sich im oberflächennahen Bereich mit rd. 16 Vol.-% bei w/z = 0,50 und mit rd. 17 Vol.-% bei w/z = 0,52 bzw. w/z = 0,54. Die Porosität des Betons mit w/z = 0,54 wurde an Probenmaterial aus dem Bereich der mörtelreichen Fläche ermittelt (s. Bild 9 rechts). Entmischungserscheinungen führten somit zu einer Erhöhung des Feinstoffanteils, des Wassergehalts sowie der Porosität an der Betonoberfläche. Unmittelbar unter der feinststoffreichen Schicht an der Oberfläche lag die Porosität bei rd. 12 Vol.-%.

Die optische Beurteilung des erhärteten Betons an Prüfkörpern aus den Eimern und Bohrkernen zeigte, dass sich trotz Einhaltung der Zielwerte der Konsistenz und der Blutwassermenge durch das Wasserabsondern eine veränderte Betonzusammensetzung im Querschnitt einstellen kann und sich ggf. Mörtelanreicherungen an der Oberfläche bilden können.

4.3 Optimization of the concrete composition in the laboratory

It was intended that the starting point for optimizing a concrete composition in the laboratory should be an initially relatively unstable concrete. The aim was to keep the cement content and water/cement ratio constant but change the concrete composition so that the stability of the concrete was ensured while maintaining the target values for consistency and water secretion required for constructing concrete floors. The stability was evaluated by visual assessment of segregation phenomena in the fresh and hardened concrete. From the collection of data for concrete floors (see Section 4.1), the data in the literature and information from contracting companies it was thought that a target flow table spread of about 540 mm on placement and a water secretion of about 3 kg/m³ in winter or 5 kg/m³ in summer would lead to the required result for concrete industrial floors. The concretes were to be produced with a cement content of 340 kg/m³ and a water/cement ratio w/c = 0.50 using superplasticizers. Concrete was produced using a CEM II/B-S 42,5 N Portland-slag cement with a fineness of 4540 cm²/g Blaine and a water demand of 31.0 %. This concrete formed a marked cement paste border in the flow table test when produced with an A16/B16 (S1) grading curve, regardless of the admixture used (see Fig. 4, top right, and Table 3).

The concrete composition was optimized by changing the grading curve of the aggregate. The influence of the particle size composition on the consistency and water secretion was investigated by carefully controlled variation of the 0/2 particle size group in the A16/B16 grading curve.

The results showed that an increase in fines content in the concrete leads to a decrease in consistency and water secretion and that the admixture addition level has a strong influence. As a rule, the formation of a paste border in the flow table test could be reduced by raising the fines content, see Fig. 4, bottom right (cf. [1]). However, very slight segregation phenomena in the pat of concrete on the flow table were also detected with the MNS admixture at the high fines content of about 390 kg/m³ in the chosen unstable concrete with the S2 grading curve (see Table 2). Fines contents of less than 370 kg/m³ are recommended for the construction of concrete industrial floors [6].

If the change in grading curve results in a higher packing density of the aggregate that is not offset by adjusting the water content then excess water and water secretion can be expected. Fig. 10 shows that a reduction in the proportion of the 0/2 particle size group with the same content of fines and very fine sand in the concrete can lead to a reduction in water secretion from about 3.5 kg/m³ to about 0.5 kg/m³.

Es wären somit erweiterte Erstprüfungen mit Durchführung eines entsprechenden Festbetonversuchs erforderlich, um Hinweise auf die Feinstoffanreicherung an der Oberfläche zu erhalten.

4.3 Optimierung der Betonzusammensetzung im Labor

Als Ausgangspunkt für die Optimierung einer Betonzusammensetzung im Labor sollte ein zunächst relativ instabiler Beton dienen. Ziel war die Betonzusammensetzung unter Beibehaltung des Zementgehalts und Wasserzementwerts so zu verändern, dass die Stabilität des Betons bei Einhaltung der Zielwerte für Konsistenz und Wasserabsondern der Bauweise Betonböden gewährleistet war. Die Stabilität wurde durch die optische Beurteilung von Entmischungserscheinungen im Frisch- und Festbeton bewertet. Aus der Betonböden-Datensammlung (s. Abschnitt 4.1), Literaturdaten und Informationen ausführender Firmen wird für Industriebetonböden ein Zielausbreitmaß von rd. 540 mm beim Einbau und ein Wasserabsondern von rd. 3 kg/m³ im Winter bzw. 5 kg/m³ im Sommer als zielführend angesehen. Dabei sollten die Betone mit einem Zementgehalt von 340 kg/m³ und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ unter Verwendung von Zusatzmitteln hergestellt werden. Es wurde ein Beton mit einem Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N mit einer Feinheit von 4540 cm²/g nach Blaine und einem Wasseranspruch von $WA = 31,0\%$ hergestellt. Dieser Beton zeigte eine starke Zementleimrandbildung im Ausbreitversuch bei der Herstellung mit einer Sieblinie A16/B16 (S1) unabhängig vom verwendeten Zusatzmittel (s. Bild 4 oben rechts und Tafel 3).

Die Optimierung der Betonzusammensetzung wurde durch Veränderungen der Sieblinie der Gesteinskörnung durchgeführt. Der Einfluss der Kornzusammensetzung auf die Konsistenz und das Wasserabsondern wurde durch eine gezielte Variation der Korngruppe 0/2 an den Sieblinien A16/B16 untersucht.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine Zunahme des Mehlkorngehalts im Beton zur Abnahme der Konsistenz und des Wasserabsonderns bei starkem Einfluss der Zusatzmitteldosierung führt. Somit konnte die Leimrandbildung im Ausbreitversuch mit einer Erhöhung des Mehlkorngehalts in der Regel vermindert werden, s. Bild 4 unten rechts (vgl. [1]). Jedoch wurden sehr leichte Entmischungserscheinungen des Ausbreitkuchens mit dem Zusatzmittel MNS auch bei hohem Mehlkorngehalt des instabilen ausgewählten Betons mit der Sieblinie S2 von rd. 390 kg/m³ festgestellt (s. Tafel 2). Für die Bauweise Industriebetonböden werden Mehlkorngehalte kleiner als 370 kg/m³ empfohlen [6].

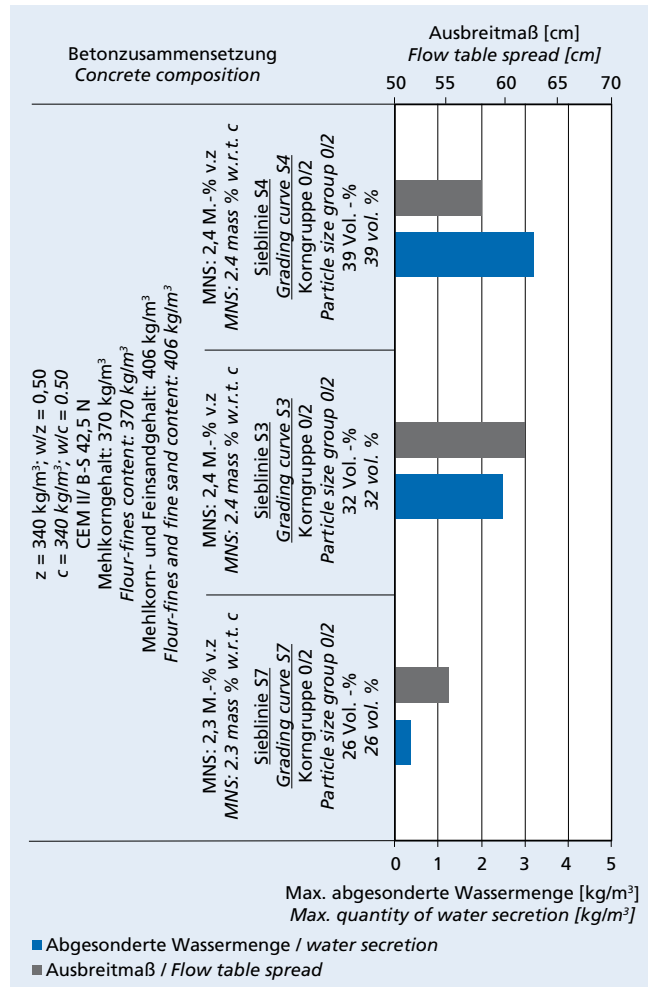


Bild 10: Einfluss der Sandkorngruppe 0/2 der Sieblinie bei gleichbleibendem Mehlkorngehalt von 370 kg/m³ auf Ausbreitmaß und abgesonderte Wassermenge

Figure 10: Influence of the 0/2 sand particle size group in the grading curve with constant flour-fines content of 370 kg/m³ on the flow table spread and quantity of water secretion

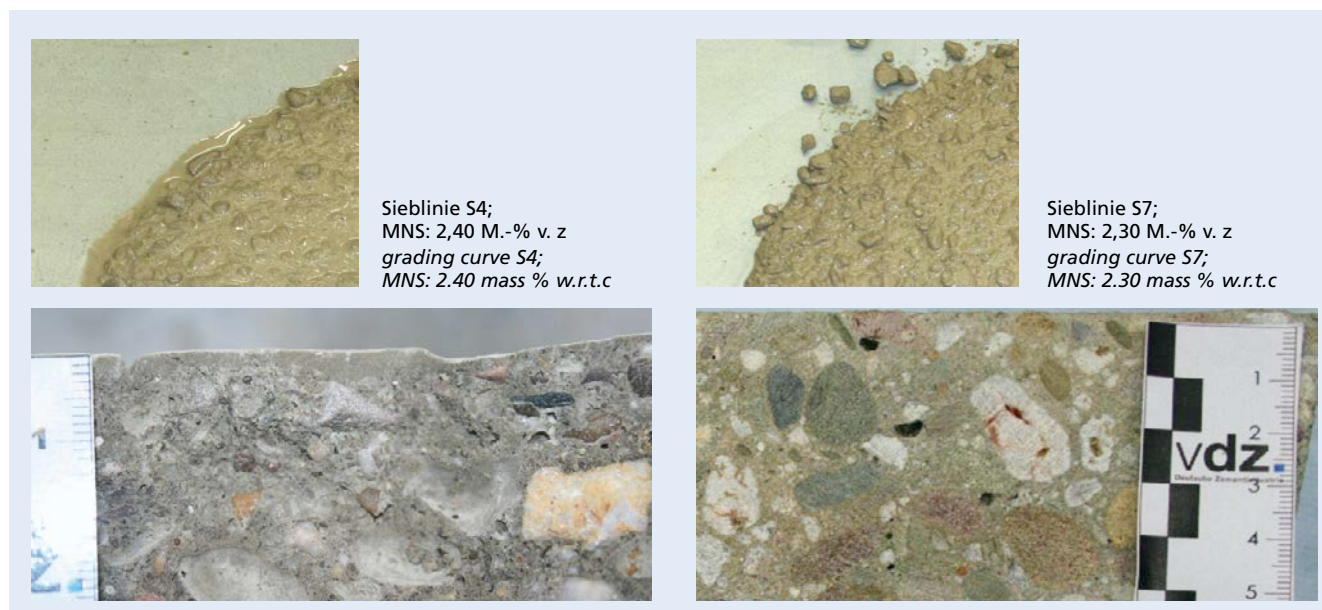


Bild 11: Einfluss der Kornzusammensetzung der Sieblinie auf die Stabilität des Frischbetons und die Feinstmörtelverteilung im Festbeton. $z = 340\text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$; Mehlkorngehalt des Betons: 370 kg/m³; Zement: CEM II/B-S 42,5 N; Zusatzmittel

Figure 11: Influence of particle size composition of the grading curve on the stability of the fresh concrete and the fine mortar distribution in the hardened concrete. $c = 340\text{ kg/m}^3$; $w/c = 0,50$; flour-fines content of the concrete: 370 kg/m³; cement: CEM II/B-S 42,5 N; admixtures

Entsteht durch die Veränderung der Sieblinie eine höhere Packungsdichte der Gesteinskörnung, auf die jedoch nicht mit einer Anpassung insbesondere des Wassergehalts reagiert wird, so ist mit einem Wasserüberschuss und Wasserabsondern zu rechnen. Bild 10 zeigt, dass eine Verringerung des Anteils Korngruppe 0/2 bei gleichbleibendem Mehlkorn- und Feinstsandgehalt des Betons zur Verringerung des Wasserabsonderns von rd. 3,5 kg/m³ auf rd. 0,5 kg/m³ führen kann.

Der mit der Sieblinie S4 hergestellte Beton zeigte bei höchster Packungsdichte und niedrigstem Wasseranspruch der Sieblinie eine leichte Zementleimumrandung im Ausbreitversuch. Die Bildung eines Wasser- und Zementleimrands im Ausbreitversuch wurde umso größer, je niedriger der Mehlkorngehalt bei unverändertem Sandanteil war. Bei Einhaltung der zuvor formulierten Zielwerte für das Ausbreitmaß und das Wasserabsondern am Frischbeton zeigten sich in Abhängigkeit der Sieblinie z.T. deutliche Zementleimablagerungen an der Oberfläche des Festbetons. Bild 11 zeigt beispielhaft, dass sich durch eine Erhöhung des Anteils der Korngruppe 0/2 von 26 Vol.-% auf 39 Vol.-% der Sieblinie A16/B16 ein Zementleimrand im Frischbeton im Ausbreitversuch bildet und im Festbeton eine oberflächige Feinmörtelanreicherung festzustellen war (s. Bild 11, links).

Bild 12 zeigt, dass Leimablagerungen an der Oberfläche des erhärteten Betons unabhängig von der Prüfgeometrie entstehen können. Die Art des Prüfkörpers kann hierbei einen Einfluss auf das Wasserabsondern haben. Mit dem Eimer wurde ein Wasserabsondern von 3,4 kg/m³ ermittelt. In der Prüfplatte war das

At the maximum packing density and minimum water demand for the grading curve the concrete produced with the S4 grading curve exhibited a slight border of cement paste in the flow table test. The formation of a water and paste border in the flow table test became greater the lower the fines content with an unchanged proportion of sand. When the previously formulated target values for flow table spread and water secretion for the fresh concrete were maintained there were significant deposits of cement paste on the surface of the hardened concrete in some cases, depending on the grading curve. Fig. 11, for example, shows that raising the proportion of the 0/2 particle size group from 26 vol. % to 39 vol. % in the A16/B16 grading curve resulted in a cement paste border in the fresh concrete in the flow table test and an accumulation of the fine mortar on the surface of the hardened concrete (see Fig. 11, left).

Fig. 12 shows that accumulations of paste can occur on the surface of the hardened concrete, regardless of the test geometry. The nature of the test piece can have an effect on the water secretion. Water secretion of 3.4 kg/m³ was measured with the bucket test, but the water secretion with the test slab of 1.9 kg/m³ was about half that value [13]. The accumulation of fine mortar on the surface of the test piece was about 5 mm thick regardless of the geometry (see Fig. 12, bottom).

Investigations were then carried out on concrete with the S9 grading curve with a fines content of 350 kg/m³. The higher packing density of the S9 grading curve when compared with the S7 curve increased the quantity of secreted water in the bucket from 0.5 kg/m³ to 2 kg/m³ (see Figs. 10 and 13). No paste or water bor-



Probekörper aus dem Eimer
Test piece from the bucket



Oberfläche des Probekörpers „Eimer“
Surface of the “bucket” test piece



Probekörper aus der Platte
Test piece from the slab



Oberfläche des Probekörpers „Platte“
Surface of the “slab” test piece

Bild 12: Feinmörtelanreicherung an Prüfkörpern aus dem Eimerverfahren (links) und Zementleimanreicherung an Prüfkörpern aus der Betonplatte (rechts); $\rho = 340 \text{ kg/m}^3$; $w/z = 0,50$; CEM II/B-S 42,5 N; Sieblinie S4; 2,4 M.-% v. z MNS

Figure 12: Accumulation of fine mortar in test pieces from the bucket method (left) and accumulation of cement paste in test pieces from the concrete slab (right); $\rho = 340 \text{ kg/m}^3$; $w/c = 5.0$; CEM II/B-S 42,5 N; grading curve S4; 2.4 mass % MNS w.r.t.c

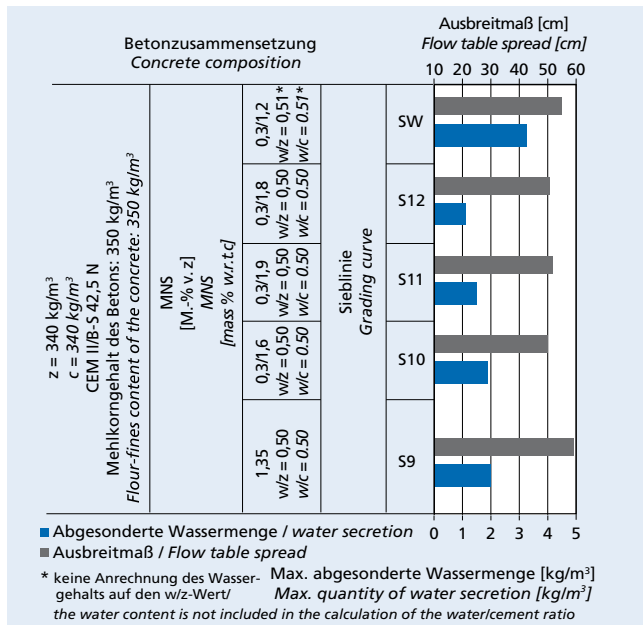


Bild 13: Einfluss der Sieblinie auf das Ausbreitmaß und die abgesonderten Wassermenge zur Optimierung der Betonzusammensetzung
Figure 13: Influence of the grading curve on the flow table spread and quantity of water secretion for optimizing the concrete composition

Wasserabsondern mit 1,9 kg/m³ etwa halb so groß [13]. Die Feinmörtelanreicherung an der Prüfkörperoberfläche hatte unabhängig von der Geometrie eine Dicke von rd. 5 mm (s. Bild 12, unten).

In der Folge wurden Untersuchungen an Beton mit der Sieblinie S9 bei einem Mehlkorngesamt von 350 kg/m³ durchgeführt. Die höhere Packungsdichte der Sieblinie S9 gegenüber S7 erhöhte die Menge an abgesondertem Wasser von 0,5 kg/m³ auf 2 kg/m³ im Eimer (s. Bild 10 und Bild 13). Dabei konnten keine Leim- oder Wasserränder beim Ausbreitversuch und keine Leimablagerungen im erhärteten Beton festgestellt werden.

Die Übertragbarkeit der Laborprüfergebnisse auf Praxisverhältnisse wurde an der Betonzusammensetzung mit der Sieblinie S9 in einem Transportbetonwerk überprüft. Hierfür war die Pumpbarkeit für den praxisgerechten Einbau des Betons zu berücksichtigen und die im Transportwerk üblicherweise verwendeten Zusatzmittel. Das Transportbetonwerk verwendet üblicherweise einen Betonverflüssiger BV im Werk und eine Kombination von Melamin- und Naphthalinsulfonaten MNS vor Übergabe auf der Baustelle. Der Einfluss üblicher Sieblinien im Transportbetonwerk wurde untersucht. Die Sieblinien S10, S11 und S12 wurden verwendet (s. Tafel 2). Die Gesteinskörnungen stammten aus dem Bestand des Forschungsinstituts. Die Betone zeigten im frischen und erhärteten Zustand keine Auffälligkeiten. Bei einem konstanten Mehlkorngesamt von 350 kg/m³ verringerte sich mit den Sieblinien S10, S11 und S12 gegenüber der Sieblinie S9 die abgesonderte Wassermenge des Betons von rd. 2,0 kg/m³ auf rd. 1,2 kg/m³.

Um die Pumpbarkeit und gleichzeitig die angestrebte abgesonderte Wassermenge von ca. 3 kg/m³ gewährleisten zu können, wurde die Korngruppe 0/2 der Sieblinie S9 geändert und entsprach der Sieblinie SW (s. Tafel 2). Bei den Laboruntersuchungen wurde der Wassergehalt der Zusatzmittel angerechnet. Dies ist bei Zugabe des MNS auf der Baustelle nicht möglich. Bild 13 zeigt den Einfluss der Sieblinie auf das Ausbreitmaß und die Blutwassermenge.

Die Ergebnisse der Optimierung zeigten, dass über die Abnahme der Korngruppe 0/2 innerhalb der Sieblinie die abgesonderte Wassermenge bei konstantem Mehlkorngesamt und bei starker Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung vermindert werden konnte. Ebenfalls zeigten die Ergebnisse, dass eine Abnahme des Mehlkorngesamtes der Sieblinie das Ausbreitmaß und die abgeson-

ders were detected in the flow table test and no paste accumulations in the hardened concrete.

The applicability of the laboratory results to practical conditions was checked using the concrete composition with the S9 grading curve in a ready-mixed concrete plant. The pumpability for practical placement of the concrete had to be taken into account, as well as the admixtures normally used in the ready-mixed plant. The ready-mixed concrete plant normally uses a BV plasticizer at the plant and a combination of melamine and naphthalene sulfonates (MNS) before handover at the construction site. The influence of the usual grading curves was investigated in the ready-mixed concrete plant. The S10, S11 and S12 grading curves were used (see Table 2). The aggregates came from the Research Institute's stock. The concretes did not exhibit any abnormalities in the fresh or hardened state. When compared with the S9 grading curve the quantity of water secreted from the concretes at a constant fines content of 350 kg/m³ was reduced from about 2.0 kg/m³ to about 1.2 kg/m³ with the S10, S11 and S12 grading curves.

The 0/2 particle size group in the S9 grading curve was changed and corresponded to the SW grading curve (see Table 2) in order to ensure the pumpability and, at the same time, the required quantity of secreted water of about 3 kg/m³. The water content of the admixtures was included in the calculations for the laboratory investigations. This is not possible for addition of the MNS at the construction site. Fig. 13 shows the influence of the grading curve on the flow table spread and quantity of secreted water.

The results of the optimization showed that for a constant fines content, and with heavy dependence on the addition level of superplasticizer, the quantity of secreted water could be reduced by lowering the 0/2 particle size group within the grading curve. The results also showed that a reduction in the fines content in the grading curve raises the flow table spread and the quantity of secreted water. The fines content needed at the required admixture addition level has to be determined in order to fulfil the requirements for workability and water secretion at the guaranteed stability.

The results obtained in the laboratory can be applied to construction site conditions to a limited extent. Water secretion measured by the bucket method may be lower under practical conditions than under laboratory conditions. For horizontal areas and the same test depth of about 20 cm this is determined by, among other things, using vibrating cylinders in comparison with vibrating tables. Transport of the fresh concrete to the construction site has to be taken into account as another influencing variable. Longer mixing times sometimes reduce the quantity of secreted water [13]. For a concrete containing the "consistency retainer" type of PCE the longer mixing times led to almost complete suppression of the water secretion [13]. However, the use of "consistency retainer" PCEs in the production of concrete industrial floors does not lead to the required result. The extended workability and resting times that this produces can delay the start of finishing and smoothing the concrete surfaces [14].

This means that the values from the bucket method cannot be applied directly to practical conditions. Furthermore, the scatter of the test method is sometimes of the same order of magnitude as the criteria/limits under discussion (see also [13, 15]). The information from this section cannot be generalized. Any other concrete compositions must be optimized to suit the constituents.

4.4 Practical concreting

Concrete was produced in a ready-mixed concrete plant on the basis of the laboratory investigations, see Section 4.3. When the concrete arrived at the construction site a superplasticizer was added to achieve the required target consistency (flow table spread) of about 540 mm.

The concrete was easy to place and compact, and there were no problems with striking off and smoothing the concrete surface. Only a small quantity of water was secreted at the surface before the start of further surface treatment. No essential differences were found between the individual test areas during placement of the concrete or during the surface treatment of the concrete and subsequent determination of the hardened concrete properties.



Bild 14: Herstellung der horizontalen Versuchsflächen am 29.02.2012
Figure 14: Production of the horizontal test surfaces on 29/02/2012

derte Wassermenge erhöhen. Um gleichzeitig die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit und das Wasserabsondern bei gewährleiseter Stabilität zu erfüllen, ist der erforderliche Mehlkorngelhalt bei der notwendigen Zusatzmitteldosierung zu ermitteln.

Eine Übertragung der im Labor gewonnenen Ergebnisse auf die Bauwerkverhältnisse ist bedingt möglich. Das Wasserabsondern im Eimerverfahren kann sich unter Praxisverhältnissen gegenüber Laborbedingungen verringern. Bei horizontalen Flächen und gleicher Versuchshöhe von rd. 20 cm wird dies u.a. durch Anwendung von Rüttelflaschen im Vergleich zum Rütteltisch festgestellt. Der Transport des Frischbetons zur Baustelle ist als weitere Einflussgröße zu berücksichtigen. Längere Mischzeiten verringerten teilweise die abgesonderte Wassermenge [13]. Bei einem Beton mit dem PCE Typ „Konsistenzhalter“ führten längere Mischzeiten zu einer annähernd vollständigen Unterbindung des Wasserabsonderns [13]. Allerdings ist die Verwendung von PCE Typ

Eight test areas were produced with two lots of concrete delivered at different times. The concrete was placed at depths of 20 cm and 25 cm for each of four areas. The fall height of the concrete from the pump was varied slightly for areas with the same placement depth. The mixing times were also extended by 15 min. Fig. 14 shows photographs of the production of the horizontal test areas.

In this case the treatment of the concrete surface (about 4.5 h after placement) began when the “stiff to semi-solid” category was reached using the knead-bag method specified in DIN 18218 (Fig. 15). The maximum quantity of water secreted by the delivered concrete in the bucket test was determined after four hours. This means that the surface treatment started quite close to the time when the quantity of water secreted in the bucket reached its maximum (cf. Section 4.1).

The penetration resistance for a penetration depth of 20 mm was measured at 5 points on each area. A penetration force of

„Konsistenzhalter“ im Falle der Herstellung von Industriebetonböden nicht zielführend. Die dadurch verlängerten Verarbeitungs- und Liegezeiten können den Beginn der Nacharbeitung und des Glättens der Betonoberflächen verzögern [14].

Eine direkte Übertragbarkeit der Werte aus dem Eimerverfahren auf Praxisverhältnisse ist somit nicht möglich. Darüber hinaus liegen die Streuungen des Prüfverfahrens teilweise in der Größenordnung diskutierter Kriterien/Grenzwerte (s. auch [13, 15]). Die Aussagen dieses Abschnittes können nicht verallgemeinert werden. Andere Betonzusammensetzungen müssen in Abhängigkeit der Ausgangsstoffe optimiert werden.

4.4 Praxisbetonage

Auf der Grundlage der Laboruntersuchungen wurde Beton in einem Transportbetonwerk hergestellt, s. Abschnitt 4.3. Bei Ankunft auf der Baustelle wurde dem Beton zur Einstellung der angestrebten Zielkonsistenz (Ausbreitmaß) von rd. 540 mm ein Fließmittel zugegeben.

Der Beton ließ sich gut einbauen und verdichten. Die Betonoberfläche konnte problemlos abgezogen und geglättet werden. Bis zum Beginn der weiteren Oberflächenbearbeitung sonderte sich nur eine geringe Menge Wasser an der Oberfläche ab. Beim Einbau des Betons sowie bei der Oberflächenbearbeitung des Betons und bei der späteren Bestimmung der Festbetoneigenschaften wurden zwischen den einzelnen Versuchsflächen keine wesentlichen Unterschiede festgestellt. Es wurden acht Versuchsflächen mit zwei zeitverschobenen Betonlieferungen hergestellt. Die Einbauhöhen von jeweils vier Flächen betrugen 20 cm und 25 cm und die Fallhöhe des Betons aus der Pumpe wurde innerhalb der Flächen gleicher Einbauhöhe leicht verändert. Darüber hinaus wurden die Mischzeiten um 15 Minuten verlängert. Bild 14 zeigt Fotos der Herstellung der horizontalen Versuchsflächen.

Der Beginn der Bearbeitung der Betonoberfläche (rd. 4,5 h nach dem Einbau) erfolgte in diesem Fall bei Vorliegen der Kategorie „steif bis halbfest“ nach dem Knetbeutelverfahren gemäß DIN 18218 (Bild 15). Die maximale abgesonderte Wassermenge des gelieferten Betons im Eimer wurde nach vier Stunden bestimmt. Somit begann die Oberflächenbearbeitung etwa zeitnah

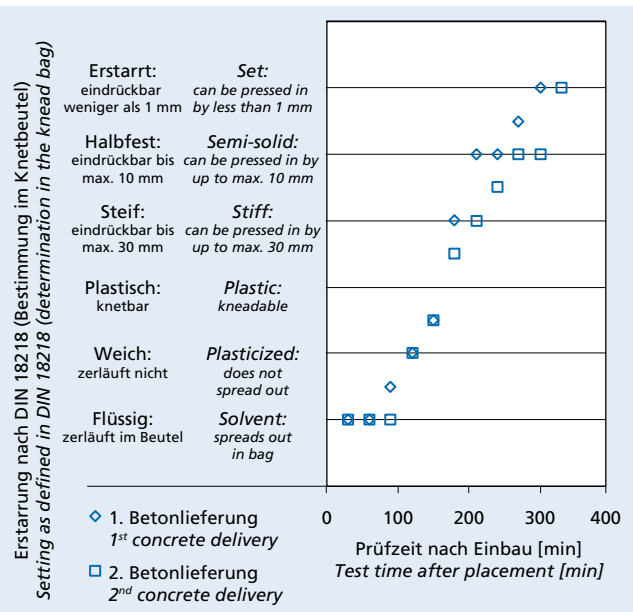


Bild 15: Ergebnisse der Untersuchungen zum Erstarren nach DIN 18218

Figure 15: Results of the investigations on setting as defined in DIN 18218

(22 ± 4) N was measured before the initial striking off (after about 4 h) while a penetration force of (96 ± 11) N was measured before the second striking off (after about 6 h). The surface tensile strengths of the test areas at 7 days were greater than 2 N/mm². Direct comparison with the results in [16] does not seem possible because the concrete surfaces in [16] were coated with an application of granolithic concrete. A penetration resistance of over 150 N is given in [16] as a guide value for walk-on stability of the concrete

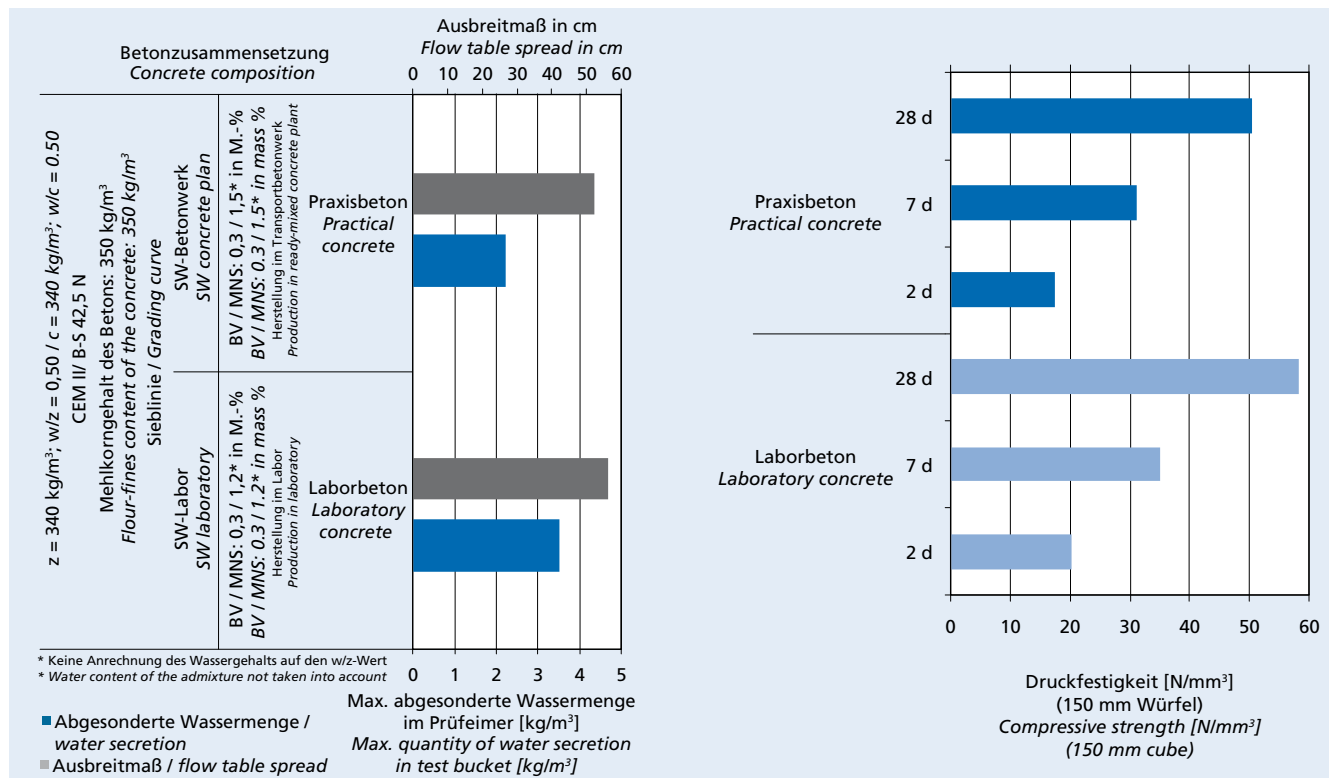


Bild 16: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften des Laborbetons und des Praxisbetons

Figure 16: Fresh and hardened concrete properties of concretes produced in the laboratory and in practice

zum Zeitpunkt des Erreichens der maximalen abgesonderte Wassermenge im Eimer (vgl. Abschnitt 4.1).

Der Penetrationswiderstand für eine Eindringtiefe von 20 mm wurde an jeweils fünf Stellen je Fläche gemessen. Vor dem ersten Abscheiben (nach ca. 4 h) wurde eine Penetrationskraft von (22 ± 4) N ermittelt. Vor dem zweiten Abscheiben (nach ca. 6 h) wurde eine Penetrationskraft von (96 ± 11) N bestimmt. Die Oberflächenzugfestigkeit der Versuchsflächen im Alter von 7 d war größer als 2 N/mm^2 . Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen in [16] erscheint nicht möglich, da die Betonoberflächen in [16] mit einer Hartstoffapplikation vergütet wurden. In [16] wird ein Penetrationswiderstand von über 150 N als Orientierungswert für die Begehrbarkeit der Betonoberfläche angegeben. Eine Oberflächenzugfestigkeit im Alter von 7 d von über $2,0 \text{ N/mm}^2$ gewährleistet einen monolithischen Verbund. Dieser Verbund wird in der Regel erreicht, wenn die Hartstoffschicht zu einem Zeitpunkt appliziert wird, zu dem der Beton einen Penetrationswiderstand zwischen 150 N und 250 N aufweist.

Zum Vergleich wurden weitere Untersuchungen mit einem Beton gleicher Zusammensetzung im Forschungsinstitut durchgeführt. Einen Überblick wesentlicher Untersuchungsergebnisse im Vergleich zeigt Bild 16.

Die abgesonderte Wassermenge im Eimerverfahren des Praxisbetons betrug rd. $2,3 \text{ kg/m}^3$. Der Vergleichsversuch im Labor ergab einen Wert von rd. $3,5 \text{ kg/m}^3$. Eine längere und intensivere Mischzeit des Praxisbetons und die Verdichtung mit der Rüttelflasche bei der Praxisbetonage im Vergleich zur Verdichtung der Eimer auf dem Rütteltisch im Labor könnten zur Verringerung des Wasserabsondens des Praxisbetons beitragen. Die Würfelzugfestigkeiten des Betons der Praxisbetonage waren zu allen Prüfterminen geringer als die des Laborbetons. Die Unterschiede können mit dem höheren Wassergehalt des Praxisbetons gegenüber dem Laborbeton erklärt werden, weil im Labor die Gesteinskörnungen trocken verwendet wurden und der Wassergehalt des Fließmittels an der Baustelle nicht berücksichtigt wurde.

Die in der Halle hergestellten Flächen wiesen keine Mörtel- bzw. Zementleimanreicherungen an den Oberflächen auf. Die Ergebnisse aus Labor und Praxis waren in dieser Hinsicht vergleichbar. Die Untersuchungen unter Laborbedingungen führten zu einer Betonzusammensetzung, die für die qualifizierte Verarbeitung zu einer hochwertigen Industriebetonbodenfläche geeignet war.

4.5 Hinweise und Empfehlungen zur Beurteilung der Stabilität und ggf. zur Optimierung der Betonzusammensetzung im Labor

Die Stabilität eines Betons für Industrieböden kann in einem ersten Schritt über die Bestimmung des Ausbreitmaßes nach dem Mischen beurteilt werden. Leim- oder Wasserränder können auf Stabilitätsprobleme des Betons hindeuten. Bei ähnlichen Ausbreitmaßen können unterschiedlich stark ausgeprägte Ränder des Ausbreitkuchens entstehen. Dabei sind schmalere Ränder und abnehmende Mengen an abgesondertem Wasser bei zunehmendem Mehlkorngelalt und bei abnehmendem Wassergehalt oder FM-Dosierung zu erwarten.

Die Bestimmung der abgesonderten Wassermenge mit dem Eimerverfahren nach [11] liefert Ergebnisse, die zur Beurteilung der Stabilität hilfreich sein können. Allerdings reicht die abgesonderte Wassermenge allein für eine Stabilitätsbeurteilung nicht aus. Mit zunehmender Menge an abgesondertem Wasser wurde auch ein zunehmender Wassergehaltsgradient im Betonquerschnitt bestimmt. Der Wassergehalt des Betons kann an Betonproben aus den Prüfkörpern im Eimer durch Trocknung ermittelt werden. Durch die optische Beurteilung des erhärteten Betons an Prüfkörpern aus den Eimern bzw. aus Bohrkernen kann abgeschätzt werden, ob sich bei Einhaltung der Zielwerte der Konsistenz und der abgesonderten Wassermenge Mörtelanreicherungen an der Oberfläche und eine veränderte Betonzusammensetzung im Querschnitt zu erwarten sind.

In erweiterten Erstprüfungen, z.B. an den erhärteten Prüfkörpern aus dem Eimerverfahren kann die Stabilität des Betons bei Einhaltung der Zielwerte von Konsistenz und Wasserabsondern

surface. A surface tensile strength of over 2.0 N/mm^2 at 7 days ensures a good monolithic bond. As a rule, this bond is achieved if the layer of granolithic concrete is applied at a time when the concrete has a penetration resistance of between 150 N and 250 N.

Further investigations with a concrete of the same composition were carried out at the Research Institute for comparison. Fig. 16 summarizes the comparison of the important results of the investigations.

The quantity of water secreted by the practical concrete in the bucket test was about 2.3 kg/m^3 . The comparison test in the laboratory gave a value of about 3.5 kg/m^3 . The longer and more intensive mixing time for the practical concrete and compaction with a vibrating cylinder during the practical concreting compared with compaction of the bucket on the vibrating table in the laboratory could contribute to the reduction in water secretion by the practical concrete. The cube compressive strengths of the concrete from the practical concreting were lower at all test ages than those of the laboratory concrete. The differences can be explained by the higher water content in the practical concrete than in the laboratory concrete because dry aggregates were used in the laboratory and the water content of the superplasticizer was not taken into account at the construction site.

The areas produced in the hall did not exhibit any surface accumulation of mortar or cement paste. In this respect the results from the laboratory and practice were comparable. The investigations under laboratory conditions led to a concrete composition that was suitable for skilled processing to give a high-grade concrete industrial floor area.

4.5 Advice and recommendations for assessing the stability and, where applicable, for optimizing the concrete composition in the laboratory

The first step in assessing the stability of a concrete for industrial floors is to determine the flow table spread after mixing. Borders of paste or water can be an indication of stability problems in the concrete. Borders of varying extent around the extended pat of concrete can be produced with similar flow table spreads. Narrower borders and decreasing quantities of secreted water can be expected with increasing fines content and decreasing water content or superplasticizer addition level.

Determination of the quantity of secreted water by the bucket method specified in [11] gives results that can be helpful for assessing the stability. However, the quantity of secreted water is not in itself sufficient for a stability assessment. An increasing water content gradient over the concrete cross-section was also found with increasing quantity of secreted water. The water content of the concrete can be determined by drying concrete samples taken from the specimens in the bucket. By visual assessment of the hardened concrete from specimens from the bucket or from drill cores it is possible to estimate whether surface accumulations of mortar and a changed concrete composition over the cross-section are to be expected when maintaining the target values for consistency and quantity of secreted water.

The stability of the concrete while maintaining the target values for consistency and quantity of secreted water can be ensured in extended initial tests, e.g. on the hardened specimens from the bucket method. The time of maximum water secretion in the laboratory investigations can serve as a guide value for the correct time of surface treatment of a concrete industrial floor.

sichergestellt werden. Der Zeitpunkt des max. Wasserabsonderns in Laboruntersuchungen kann als Orientierungswert für den richtigen Zeitpunkt der Oberflächenbearbeitung eines Industriebetonbodens gelten.

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen liefern Erkenntnisse, die zu einer zielsicheren Herstellung von Industriebetonböden in der Praxis beitragen können.

Durch die Erarbeitung und Auswertung einer praxisbasierten Datensammlung zur Betonzusammensetzung sowie die Dokumentation der Herstellung von Industriebetonböden auf Baustellen wurden praxisrelevante Anhaltswerte für die Betonzusammensetzungen, für die Einbaukonsistenz und für das Wasserabsondern gewonnen. Im Zentrum der Betrachtungen stand die Auswirkung der Betonzusammensetzung auf die Stabilität des Betons. Leim- oder Wasserränder des Ausbreitkuchens deuten auf unzureichende Stabilität des Betons hin. Die Ergebnisse zeigen, dass die abgesonderte Wassermenge allein für eine Stabilitätsbeurteilung eines Betons für Industriebetonböden nicht ausreicht. Die optische Beurteilung des erhärteten Betons an Prüfkörpern zeigte, dass sich trotz Einhaltung der Zielwerte der Konsistenz und abgesonderten Wassermenge eine veränderte Betonzusammensetzung im Querschnitt einstellen kann und sich ggf. Mörtelanreicherungen an der Oberfläche bilden können. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Möglichkeiten der Optimierung der Betonzusammensetzung im Labor aufgezeigt. Die Untersuchungen unter Laborbedingungen führten zu einer Betonzusammensetzung, die für die qualifizierte Verarbeitung zu einer hochwertigen Industriebetonbodenfläche in der Praxis geeignet war.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16328 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. bzw. VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

5 Summary

The results of these investigations provide findings that can contribute to dependable practical production of concrete industrial floors. By compiling and evaluating a collection of data for the concrete compositions that are actually used, as well as documentation of the production of concrete industrial floors on construction sites, practical guide values were obtained for the concrete compositions, placement consistency and water secretion. The treatment focused on the effect of the concrete composition on the stability of the concrete. Paste or water borders around the flow table pat indicate inadequate stability of the concrete. The results show that the quantity of water secretion alone is not sufficient for assessing the stability of a concrete for concrete industrial floors. Visual assessment of the hardened concrete in test pieces showed that in spite of meeting the target values for consistency and quantity of water secretion the concrete composition can change over the cross-section because of the water secretion, and accumulations of mortar may occur at the surface. Possible ways of optimizing the concrete composition were highlighted in the laboratory during the investigations. The investigations under laboratory conditions led to a concrete composition that proved suitable in practice for skilled processing into high-grade concrete industrial floor areas.

Funding note

IGF project 16328 N of the Research Association of the VDZ (German Cement Works Association) and of VDZ gGmbH was funded through the AiF (Federation of Industrial Research Associations) as part of the programme by the Federal Ministry for Economics and Energy based on a decision by the German Federal Parliament to promote joint industrial research and development (IGF).

Literatur / Literature

- [1] Breitenbücher, R.: Potentielle Ursachen von Mängeln in Industrieböden aus Beton und deren Bewertung. Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe, März 2007. Universitätsverlag, Karlsruhe 2007, S.73-81
- [2] Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe 8TH, 15. März 2007. Universitätsverlag, Karlsruhe 2007
- [3] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E. V. (DBV): Merkblatt Industrieböden aus Beton für Frei- und Hallenflächen. Berlin 2004
- [4] Bundesverband Estrich und Belag e.V. (BEB); Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e. V. (DBV): Betonböden für Hallenflächen, Troisdorf/Berlin, Februar 2000
- [5] Ebeling, K.: Betonböden für Produktions- und Lagerhallen. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2006
- [6] Lohmeyer, G.; Ebeling, K.: Betonböden für Produktions- und Lagerhallen. Planung, Bemessung, Ausführung. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2012
- [7] Wöhl, U.: Betontechnologische Aspekte bei der Ausführung von Bodenplatten. Industrieböden aus Beton. 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Universität Karlsruhe 8TH, 15. März 2007, Universitätsverlag, Karlsruhe 2007, S. 57-61
- [8] Krell, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung. Schriftenreihe der Zementindustrie 46, Betonverlag, Düsseldorf 1985
- [9] Rendchen, K.: Einfluss der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons. Schriftenreihe der Zementindustrie 45, Betonverlag, Düsseldorf 1985
- [10] Schießl, P.; Weber, J.W.; Schwamborn, B.; Leißner, J.: Bluten von Frischbeton. Schriftenreihe des Bundesverbands der Deutschen Transportindustrie. Betonverlag, Düsseldorf 1998
- [11] Merkblatt: Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton. Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E. V. (DBV), Berlin 2007
- [12] www.vdz-online.de/abgeschlossene_projekte.html
- [13] Alonso, M. T.; Schäffel, P.: Das Wasserabsondern von Beton. Laborergebnisse und Übertragbarkeit auf praktische Verhältnisse. beton 64 (2014) H. 11, S. 455-469 und H. 12, S. 509-515
- [14] Deutsche Bauchemie: Anwendung von Fließmitteln auf PCE-Basis im Industriebodenbau. Informationsschrift Deutsche Bauchemie e.V., 1. Ausgabe, Frankfurt am Main 2011
- [15] Heese, C.; Breit, W.: Ermittlung der Blutneigung im Eimerverfahren. Verfahrensbedingte Einflussparameter. beton 62 (2012) H. 4, S. 110-115
- [16] Breitenbücher, R.; Siebert, B.: Zielsichere Herstellung von Industrieböden mit Hartstoffschichten. beton 56 (2006) H. 4, S. 148-156

Jochen Reiners, Christoph Müller, Düsseldorf, Joose Penttilä, Rolf Breitenbücher, Bochum

Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe

Achieving the intended concrete properties in modern 5-material systems of varied concrete constituents

Übersicht

Einhergehend mit der Entwicklung zu weicheren Betonen wird derzeit immer wieder beobachtet, dass sich Frischbetoneigenschaften bei länger andauernden Bauvorhaben trotz gleicher Betonzusammensetzung unerwartet bzw. unvorhersehbar signifikant verändern. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt des Forschungsinstituts der Zementindustrie mit der Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Lehrstuhl für Baustofftechnik, wurden Kriterien für den Entwurf von Betonzusammensetzungen erarbeitet, die erfüllt sein sollten, damit kein unerwünschtes Frischbetonverhalten auftritt und die ungewollte Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften durch material- und produktionsbedingte Schwankungen der Betonausgangsstoffe möglichst gering ist.

1 Einleitung und Forschungsziel

Die Weiterentwicklung betonverflüssigender Zusatzmittel – insbesondere Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether „PCE“ – führte in den vergangenen Jahren vermehrt zur Verwendung von Betonen mit weicher Konsistenz. Solche Betone können leichter eingebracht und verdichtet werden, wodurch schnellere Arbeitsabläufe und Kostenreduzierungen erzielt werden können [1].

Einhergehend mit der Entwicklung zu weicheren Betonen wird immer wieder beobachtet, dass sich Frischbetoneigenschaften bei länger andauernden Bauvorhaben trotz gleicher Betonzusammensetzung und gleichen Ausgangsstoffen unerwartet bzw. unvorhersehbar signifikant verändern. Bei Betonen, die zuvor mehrfach ohne Schwierigkeiten verarbeitet werden konnten, treten scheinbar ohne nachvollziehbare Gründe Abweichungen vom bisherigen Verhalten auf, wie zum Beispiel eine veränderte Konsistenz, ein Absondern von Wasser (Bluten), Sedimentation oder eine beschleunigte oder verlangsamte Festigkeitsentwicklung [2, 3].

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten die wichtigsten Einflussparameter identifiziert werden, die für ungewollte Abweichungen der Frischbetoneigenschaften verantwortlich sind. Darüber hinaus sollten Kriterien für den Entwurf von Betonzusammensetzungen erarbeitet werden, damit kein unerwünschtes Frischbetonverhalten auftritt und die Anfälligkeit gegenüber material- und produktionsbedingten Schwankungen möglichst gering ist. Als „robust“ wurden im Forschungsvorhaben solche Betonzusammensetzungen bezeichnet, bei denen sich die Frischbetoneigenschaften weder infolge von praxisüblichen Einflussfaktoren bei der Betonherstellung noch infolge produktionsbedingter und praxisüblicher Schwankungen der Ausgangsstoffe unerwartet und signifikant änderten.

2 Untersuchungen

2.1 Arbeitsschritt 1: Untersuchung von Betonzusammensetzungen hinsichtlich ihrer Neigung zu unerwünschten Frischbetoneigenschaften

Im einem ersten Arbeitsschritt wurden Betone mit Leimgehalten von rd. 245 l/m³ bis rd. 300 l/m³ hergestellt, der Begriff Leimgehalt umfasst dabei Zement, Zusatzstoffe, den Mehlkorngelhalt der Gesteinskörnung (Korngröße 0 bis 0,125 mm) und Wasser. Die Betone hatten äquivalente Wasserzementwerte zwischen

Abstract

Associated with the trend towards softer concretes it is now often found that significant changes in the fresh concrete properties occur unexpectedly and unpredictably in longterm construction projects in spite of using the same concrete composition. In a joint research project between the Research Institute of the Cement Industry and the Chair of Building Materials Technology in the Institute for Structural Civil Engineering at Ruhr University Bochum criteria were worked out for designing concrete mix formulations. The intention is that these criteria should be fulfilled to prevent the occurrence of undesirable fresh concrete behaviour and so that the inadvertent influence on the fresh concrete properties caused by material- and production-induced fluctuations in the concrete constituents is as small as possible.

1 Introduction and research objective

In recent years the onward development of admixtures for plasticizing concrete – especially superplasticizers based on PCE (polycarboxylate ether) – has led increasingly to the use of concretes with soft consistencies. These concretes are easier to place and compact, which makes it possible to accelerate the job sequences and reduce costs [1].

Associated with the trend towards softer concretes it is often found that significant, unexpected and unpredictable changes in the fresh concrete properties occur in construction projects that extend over fairly long periods in spite of the use of the same concrete composition and the same constituents. Deviations from previous behaviour occur for apparently inexplicable reasons with concretes that had previously been processed many times without any problems. These deviations include changed consistency, secretion of water (bleeding), sedimentation and accelerated or retarded strength development [2, 3].

The research project was intended to identify the most important influencing parameters that are responsible for undesirable changes in the fresh concrete properties. The intention was also to work out criteria for the design of concrete compositions so that no unwanted fresh concrete behaviour occurs and to minimize the susceptibility to fluctuations caused by materials or production. In the research project the term „robust“ was applied to those concrete compositions in which the fresh concrete properties did not change unexpectedly and significantly either as a consequence of the usual influencing factors found in concrete production or as a consequence of fluctuations in the constituents that normally occur in practice due to the production process.

2 Investigations

2.1 Working step 1: Investigation of concrete compositions with respect to their tendency towards undesirable fresh concrete properties

The first step was to produce concretes with paste contents of approx. 245 l/m³ to approx. 300 l/m³. The term „paste content“ includes cement, admixtures, the flour-fines content of the aggregate (particle size 0 to 0.125 mm) and water. The concretes had equivalent water/cement ratios between 0.45 and 0.65. Four

Ziel-Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5: 55 cm
 Sieblinien: AB 16 und B 16, Zement: CEM II/A-LL 32,5 R
 Target flow table spread as specified in DIN EN 12350-5: 55 cm
 Grading curves: AB 16 and B 16, cement: CEM II/A-LL 32,5 R
 Bezeichnung der Betone: Zementgehalt [kg/m³]/
 Flugaschegehalt [kg/m³]/w/z_{eq}/Fließmittel [M.-% v.z.]
 Concrete designation: cement content [kg/m³]/
 fly ash content [kg/m³]/w/c_{equiv}/superplasticizer [mass % w.r.t. c]

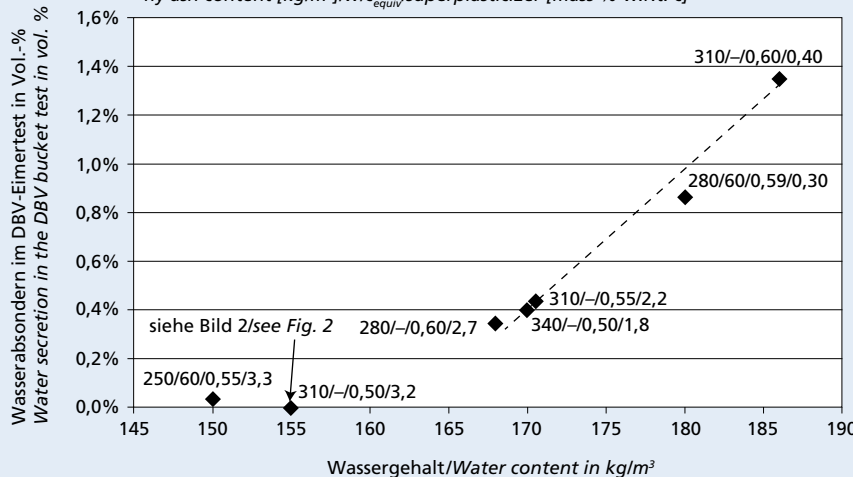


Bild 1: Wasserabsondern nach dem DBV-Eimertest, bezogen auf den Wassergehalt im Beton (Frischbetontemperatur ca. 20 °C, Fließmittel auf PCE-Lignin-Basis)

Figure 1: Water secretion in the DBV bucket test relative to the water content in the concrete (fresh concrete temperature approx. 20 °, superplasticizer based on PCE-lignin)

0,45 und 0,65. Zur Einstellung der Zielkonsistenz (Ausbreitmaß 55 cm, unmittelbar nach Mischzeitende) wurden vier verschiedene Fließmittel verwendet. An den Betonen wurden folgende Eigenschaften bestimmt, um die Betone hinsichtlich ihrer Neigung zu unerwünschten Frischbetoneigenschaften bei definierten Einflussparametern (Temperatur, Sieblinie oder Mischzeit) einordnen zu können:

- Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [4] zu verschiedenen Zeitpunkten nach der Betonherstellung (0, 45 und 90 min)
- Ende der Verarbeitbarkeitszeit nach der DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton) [5]
- Wasserabsondern durch Ermittlung der Blutwassermenge („Eimerverfahren“) nach DBV-Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ [6]
- Sedimentationsneigung (Sedimentationsversuch in Anlehnung an die Richtlinie des DAfStb „Selbstverdichtender Beton“ [7])
- Luftgehalt von Frischbeton (Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 [8])

Häufig konnte eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen der Menge des Zugabewassers und der Blutwassermenge nach dem DBV-Eimerverfahren festgestellt werden (Bild 1). Bei den untersuchten Betonen kam es bei Wassergehalten > 170 l/m³ regelmäßig zu Blutwassermengen, die den im DVB-Merkblatt für Konstruktionsbetone genannten Anhaltswert von 0,3 Vol.-% zum Teil deutlich überschritten, dabei aber auf dem Ausbreittisch meist optisch stabil wirkten und einen guten Zusammenhalt aufwiesen. Auf der anderen Seite führten geringe Wasser- und Leimgehalte in Kombination mit hohen Fließmitteldosierungen zu Betonen, die auf dem Ausbreittisch Entmischungserscheinungen, insbesondere das Absetzen von Zementschlämpen, zeigten (Bild 2). Diese Betone wiesen meist weder ein Wasserabsondern im DBV-Eimertest noch ein Sedimentieren grober Gesteinskörnung im Sedimentationsversuch oder andere messbare Frischbetoneigenschaften auf, die ihre Eignung in Frage stellen würden.



Bild 2: Entmischungserscheinungen bei einem Beton mit einem Leimgehalt von ca. 260 l/m³ (siehe Kennzeichnung in Bild 1)

Figure 2: Segregation phenomena in concrete with a paste content of approx. 260 l/m³ (see designation in Fig. 1)

different superplasticizers were used to achieve the target consistency (flow table spread of 55 cm immediately after the end of mixing). The following concrete properties were determined in order to classify the concretes with respect to their tendency towards undesirable fresh concrete properties with specific influencing parameters (temperature, grading curve and mixing time):

- Flow table spread as specified in DIN EN 12350-5 [4] at different times after production of the concrete (0, 45 and 90 min)
- End of the workability time as specified in the DAfStb guidelines for concrete with extended workability times (retarded concrete) [5]
- Water secretion by determining the quantity of bleed water (“bucket method”) in accordance with the DVB code of practice “Special methods for testing fresh concrete” [6]
- Tendency to sedimentation (sedimentation test following the “Self-compacting concrete” guidelines issued by the DAfStb [7])
- Air content of the fresh concrete (pressure equalization method as specified in DIN EN 12350-7 [8])

A virtually linear relationship was often observed between the quantity of mixing water and the quantity of bleed water measured by the bucket method (Fig. 1). Quantities of bleed water that sometimes significantly exceeded the reference value of 0.3 vol. % given in the DVB code of practice for structural concretes occurred regularly with the concretes with water contents > 170 l/m³ that were examined. However, most of these concretes appeared visually stable on the flow table and exhibited good cohesion. On the other hand, low levels of water and paste combined with high addition levels of superplasticizer led to concretes that exhibited segregation phenomena on the flow table, especially the sedimentation of cement slurry (Fig. 2). Most of these concretes did not exhibit any water secretion in the DBV bucket test or sedimentation of coarse aggregate in the sedimentation test, or any other measurable fresh concrete properties that would cast doubt on their suitability.

2.2 Influence of the material properties of the concrete constituents on the uniformity of the fresh concrete properties

2.2.1 General

The second working step was to investigate how parameters on which the concrete producer generally has little or no influence can affect the fresh concrete properties. The focus was on the way that the variability of the material properties of the concrete constituents affected the uniformity of the characteristic fresh concrete

Tafel 1: Für das Forschungsvorhaben gewählte Einflussparameter von Zementen und die gewählten Variationsbreiten
Table 1: The influencing cement parameters selected for the research project and the chosen ranges of variation

Einflussparameter <i>Influencing parameter</i>	Gewählte Variationsbreite <i>Chosen range of variation</i>
Mahlfeinheit des Zementklinkers <i>Fineness of grinding of the cement clinker</i>	Variation um $\pm 400 \text{ cm}^2/\text{g}$ nach Blaine, ausgehend von der Mahlfeinheit des Klinkers der beiden Werkszemente <i>Variation by $\pm 400 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine, based on the fineness of the clinker in the two plant cements</i>
Sulfatgehalt des Zements <i>Sulfate content of the cement</i>	Variation von 2,5 M.-% SO_3 bis 3,0 M.-% SO_3 <i>Variation from 2.5 mass % SO_3 to 3.0 mass % SO_3</i>
Verhältnis der Sulfatträger Halbhydrat (leichtlöslich) und Anhydrit (schwerlöslich) <i>Ratio of the hemihydrate sulfate agent (readily soluble) to anhydrite (sparingly soluble)</i>	Variation von (25 % Anhydrit/75 % Halbhydrat) bis (75 % Anhydrit/25 % Halbhydrat) <i>Variation from 25 % anhydrite/75 % hemihydrate to 75 % anhydrite/25 % hemihydrate</i>

2.2 Einflüsse der stofflichen Eigenschaften der Betonausgangsstoffe auf die Gleichmäßigkeit der Frischbetoneigenschaften

2.2.1 Allgemeines

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde untersucht, wie Parameter, auf die der Hersteller eines Betons im Allgemeinen keinen oder nur wenig Einfluss hat, die Frischbetoneigenschaften beeinflussen können. Im Fokus stand dabei die Variabilität der stofflichen Eigenschaften der Betonausgangsstoffe auf die Gleichmäßigkeit der charakteristischen Frischbetoneigenschaften. Auf Grundlage der Ergebnisse aus dem ersten Arbeitsschritt wurden für die weiteren Untersuchungen als „sensibel“ bewertete Betonzusammensetzungen gewählt. Diese Betonzusammensetzungen wiesen bereits eine Tendenz zu einer oder mehreren unerwünschten Eigenschaften auf oder zeigten optisch Tendenzen zur Absonderung von Zementschlümpen, konnten jedoch noch als geeignet für die Anwendung in der Praxis bewertet werden.

Folgende Variationsparameter wurden betrachtet:

- Schwankungen der Eigenschaften der verwendeten Zemente
- Schwankungen der Eigenschaften der verwendeten Fließmittel
- Schwankungen in der Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung (Sand 0 bis 2 mm)
- Toleranzen beim Dosieren der Betonausgangsstoffe

2.2.2 Veränderung von Zementeigenschaften

Die Auswirkungen der Veränderungen von Zementeigenschaften wurden durch die Verwendung verschiedener Laborzemente mit definierten Eigenschaften untersucht. Dies hatte den Vorteil, dass gezielt bekannte Einflussfaktoren auf Zementeigenschaften variiert und der Einfluss auf Frischbetoneigenschaften beobachtet werden konnte. Hierzu wurden zunächst Laborzemente durch das Mahlen von Portlandzementklinker und das Mischen des gemahlten Portlandzementklinkers mit weiteren gemahlten Zementhauptbestandteilen sowie zwei verschiedenen Sulfatträgern hergestellt. Variiert wurden die Mahlfeinheit des Portlandzementklinkers, der Sulfatgehalt des Zements und das Verhältnis der Sulfatträger Halbhydrat (leichtlöslich) und Anhydrit (schwerlöslich). Tafel 1 zeigt die gewählten Variationsbreiten. Es sollte betont werden, dass die variierten Parameter in der Praxis nicht „zufällig“ oder ungewollt für eine Zementart in diesen Bandbreiten schwanken werden. Die Variationsbreiten wurden vielmehr stellvertretend für die Bandbreite dieser Zementeigenschaften als Steuergrößen zum Erreichen der Zementnormeigenschaften über lange Produktionszeiträume gewählt, um die Einflüsse auf die Eigenschaften unterschiedlich zusammengesetzter Frischbetone zu untersuchen.

Zur vergleichenden Betrachtung der Eigenschaften der Laborzemente wurden zunächst Leime aus den Laborzementen und Wasser ($w/z = 0,35$) hergestellt und ihr Scherwiderstand im Viscomaten, Typ Schleibinger NT, untersucht. Als Versuchsprofil für den Viskomaten wurde hierbei ein im VDZ häufig verwendetes Standardprofil verwendet, bei dem das Gefäß, das den Zementleim enthält, jeweils fünf Minuten lang mit 60 Umdrehungen pro Minute (U/min), 80 U/min, 100 U/min, 80 U/min und 60 U/min

properties. Concretes that had been evaluated as “sensitive” on the basis of the results from the first working step were selected for the subsequent investigations. These concrete compositions had already exhibited a tendency towards one or more undesirable properties or had shown a visual tendency towards secretion of cement slurry but could still be evaluated as suitable for practical use.

The following variation parameters were considered:

- Fluctuations of the properties of the cements used
- Fluctuations of the properties of the superplasticizers used
- Fluctuations in the particle size composition of the aggregate (0 to 2 mm)
- Tolerances when adding the concrete constituents

2.2.2 Alteration of the cement properties

The effects of altering the cement properties were investigated by using different laboratory cements with defined properties. This had the advantage that known factors that affect cement properties could be varied selectively and their influence on the fresh concrete properties observed. The laboratory cements were produced by grinding Portland cement clinker and mixing the ground Portland cement clinker with other ground main cement constituents and two different sulfate agents. The fineness of the Portland cement clinker, the sulfate content of the cement and the ratio of the sulfate agents – hemihydrate (readily soluble) and anhydrite (sparingly soluble) – were varied. Table 1 shows the chosen ranges of variation. It should be stressed that in practice the parameters that were varied do not fluctuate over these ranges “randomly” or unintentionally for one type of cement. The ranges of variation were in fact chosen to represent the ranges of these cement properties as control variables for achieving standard cement properties over long production periods in order to investigate the effects on the properties of fresh concretes with different compositions.

Pastes were produced from the laboratory cements and water ($w/c = 0.35$) and their shear resistances were investigated in the Schleibinger NT Viscomat for comparative observation of the properties of the laboratory cements. A standard profile that is often used in the VDZ was employed as the test profile for the Viscomat. The vessel that contains the cement paste is rotated for five minutes each at 60 rpm, 80 rpm, 100 rpm, 80 rpm and 60 rpm. Fig. 3 shows the measured shear resistances for the Portland-slag cements produced in the laboratory.

The results of the investigations carried out on the cement pastes showed that

- a variation of the sulfate content within the chosen limits had only a very slight influence on the shear resistance of the cement pastes in the Viscomat.
- in most cases a variation in the fineness of grinding of the clinker within the chosen limits had only a slight influence on the shear resistance of the cement pastes. In a small proportion of the comparative investigations a greater fineness of grinding of the cement clinker led to a somewhat higher shear resistance.

gedreht wird. Bild 3 zeigt die gemessenen Scherwiderstände für im Labor hergestellte Portlandhüttenzemente.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den Zementleimen zeigten, dass

- eine Variation des Sulfatgehalts in den gewählten Grenzen nur einen sehr geringen Einfluss auf den Scherwiderstand der Zementleime im Viskomaten hatte
- eine Variation der Mahlfineinheit des Klinkers in den gewählten Grenzen meist einen nur geringen Einfluss auf den Scherwiderstand der Zementleime hatte. Bei einem geringen Teil der vergleichenden Untersuchungen führte eine größere Mahlfineinheit des Klinkers zu einem etwas höheren Scherwiderstand.
- das Verhältnis der Sulfatträger erwartungsgemäß einen deutlichen Einfluss auf den Scherwiderstand der Zementleime hatte: ein größerer Halbhydrat-Anteil führte dazu, dass schneller Sulfat in der Porenlösung verfügbar und der Scherwiderstand nach der Herstellung des Zementleims höher als bei den Vergleichszementen war.

Als Anforderung an „robuste“ Betone lässt sich formulieren, dass sich die für Zementleim beobachteten Abhängigkeiten auch auf die Frischbetoneigenschaften übertragen lassen sollten, und die Betone somit „erwartungsgemäß“ reagieren. Dies würde bedeuten, dass für robuste Betone

- die Eigenschaften der untersuchten Frischbetone sich bei der Veränderung der Mahlfineinheit des Zementklinkers oder des Sulfatgehalts des Zements (im Rahmen der untersuchten Schwankungsbreiten) nur geringfügig ändern und
- eine Veränderung des Verhältnisses der Sulfatträger von HH/AH = 25 %/75 % zu HH/AH = 75 %/25 % ein schnelleres Ansteifen des Frischbetons nach sich ziehen kann.

Dies wurde an Betonen mit verschiedenen Leimgehalten überprüft.

Ein im ersten Arbeitsschritt als „sensibel“ eingestuftter Beton mit einem Leimgehalt von ca. 265 l/m³ zeigte bei einer Veränderung der o.g. Zementeigenschaften im Labor z.T. eine unplanmäßige Nachverflüssigung sowie große Unterschiede bei der abgeordneten Wassermenge im DBV-Eimertest (Bild 4).

Demgegenüber entwickelte sich das Ausbreitmaß eines Betons mit einem Leimgehalt von ca. 300 l/m³ auch bei einer Veränderung der Zementeigenschaften stets erwartungsgemäß (Bild 5): ein geringeres Ausbreitmaß konnte nur bei Verwendung der Zemente

- as expected, the ratio of the sulfate agents had a significant influence on the shear resistance of the cement pastes: a larger proportion of hemihydrate meant that sulfate was available more rapidly in the pore solution and the shear resistance after production of the cement paste was higher than with the other cements.

It was formulated as a requirement for “robust” cements that the dependencies observed for cement paste should also be applicable to the fresh concrete properties and that the concretes should therefore react “as expected”. For robust concretes this would mean that

- the properties of the fresh concretes investigated change only slightly when the fineness of grinding of the cement clinker or the sulfate content of the cement are altered (within the range of fluctuation investigated), and
- a change in the ratio of the sulfate agents from HH/AH = 25 %/75 % to HH/AH = 75 %/25 % can result in more rapid stiffening of the fresh concrete.

This was checked on concretes with different paste contents.

When the above-mentioned properties were altered in the laboratory a concrete with a paste content of approx. 265 l/m³ that had been classified as “sensitive” in the first working step sometimes exhibited unplanned re-plasticizing and great differences in the quantity of water secreted in the DBV bucket test (Fig. 4).

On the other hand, the flow table spread of a concrete with a paste content of approx. 300 l/m³ always behaved in line with expectations during changes in the cement properties (Fig. 5): a lower flow table spread was only observed when using the cements with HH/AH = 75 %/25 % (cement A3), while the flow table spreads of concretes containing the other cements exhibited very similar behaviour. The quantity of water secreted exhibited smaller fluctuations than with the concrete composition containing less paste. The concrete with the higher paste content was therefore “more robust” than the concrete with a paste content of only 265 l/m³.

2.2.3 Fluctuations in the properties of the sand and the superplasticizer
The fine fractions have a particular influence on the properties of the fresh concrete and also of the hardened concrete [9] so even the natural dispersion in the fine particle content of the sand can have an adverse effect on the uniformity of the concrete properties,

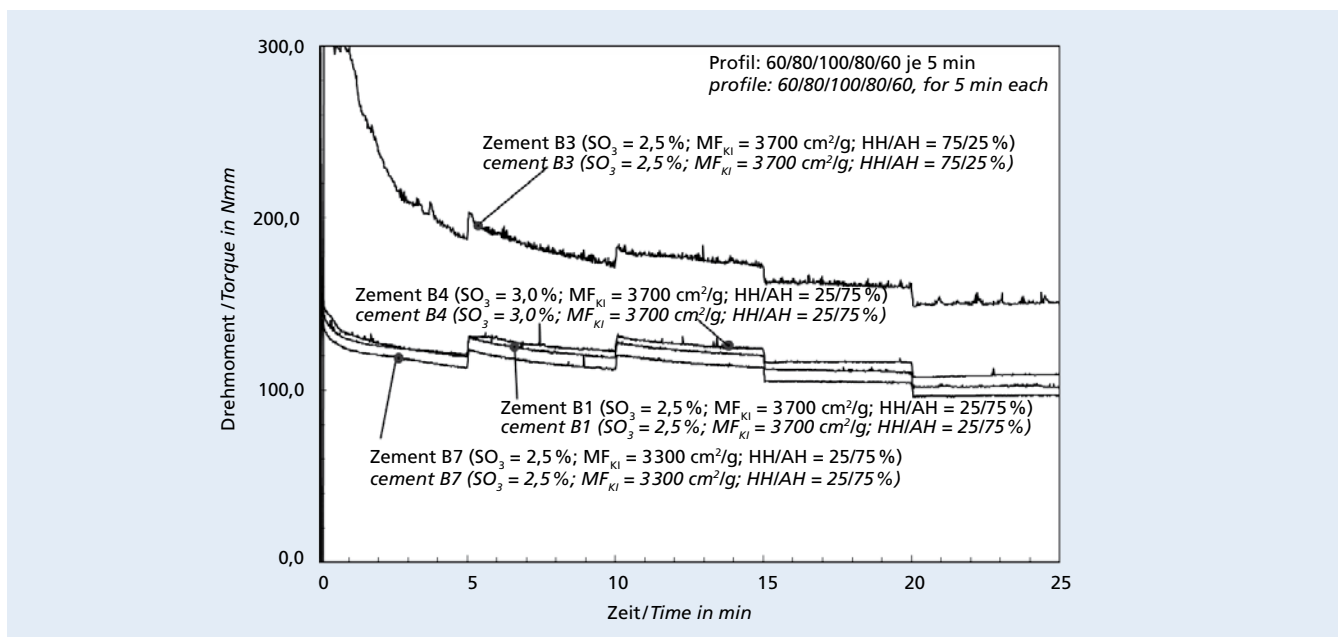


Bild 3: Scherwiderstand von Portlandhüttenzement-Leimen (w/z = 0,35) im Viskomaten (MF_{Kl}: Mahlfineinheit Zementklinker)

Figure 3: Shear resistance of Portland-slag cement pastes (w/c = 0.35) in the viscometer (MF_{Kl}: fineness of grinding of the cement clinker)

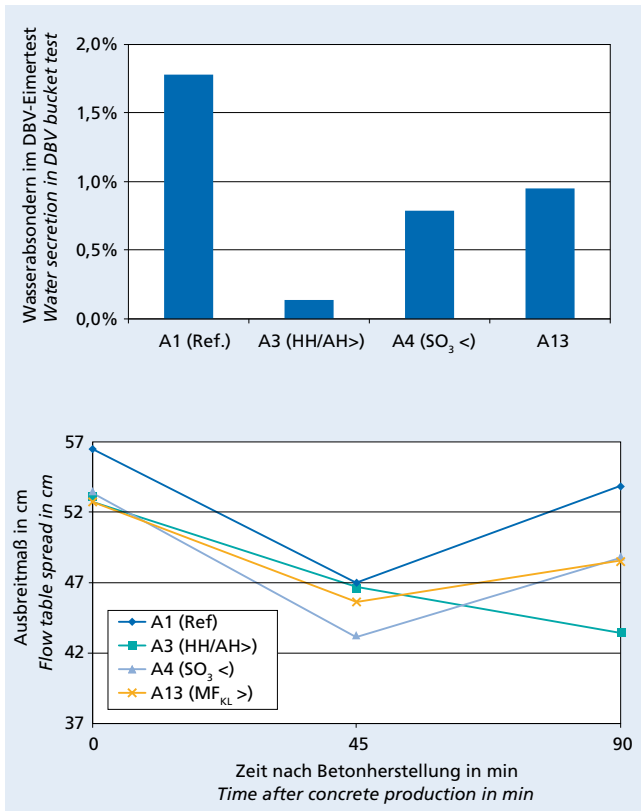


Bild 4: Wasserabsondern und zeitliche Entwicklung der Konsistenz und des Wasserabsonderns von Betonen gleicher Zusammensetzung (Leimgehalt ca. 265 l/m³) bei labortechnischer Veränderung der Eigenschaften des verwendeten Zements (Zementgehalt 340 kg/m³, Wassergehalt 153 kg/m³, w/z = 0,45, Sieblinie AB16, Fließmittel PCE)

Figure 4: Water secretion and change with time of the consistency and water secretion of concretes with the same composition (paste content approx. 265 l/m³) during laboratory changes to the properties of the cement used (cement content 340 kg/m³, water content 153 kg/m³, w/c = 0.45, grading curve AB16, PCE superplasticizer)

mit HH/AH = 75 %/25 % (Zement A3) beobachtet werden, während sich das Ausbreitmaß der Betone mit den anderen Zementen sehr ähnlich entwickelte. Die abgesonderte Wassermenge wies geringere Schwankungen als bei der leimärmeren Betonzusammensetzung auf. Der Beton mit dem höherem Leimgehalt war somit „robuster“ als der Beton mit einem Leimgehalt von nur 265 l/m³.

2.2.3 Schwankungen der Eigenschaften von Sanden und Fließmitteln

Da insbesondere Feinanteile die Frisch- aber auch Festbetoneigenschaften beeinflussen [9], können bereits naturgemäße Streuungen im Feinkorngehalt des Sands die Gleichmäßigkeit der Eigenschaften von Betonen, vor allem hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit, beeinträchtigen. Daneben wurde in der Praxis festgestellt, dass sich mit abnehmenden Feinanteil im Sand auch die Sedimentations- bzw. Blutneigung des Betons erhöhen kann [10]. Zur Erfassung praxisüblicher Schwankungen in der Zusammensetzung der feinen Gesteinskörnung (Rheinsand 0 bis 2 mm) und der Fließmittel (zwei unterschiedliche PCE-Fließmittel) erfolgte eine mehrfache Probenahme dieser Betonausgangsstoffe über einen Zeitraum von ca. einem Jahr direkt aus den jeweiligen Anlieferungen in einem Transportbetonwerk. Die Entnahme der Sandproben (aus dem jeweils gleichen Lieferwerk) erfolgte aus dem Silo des Transportbetonwerks, wobei der Füllstand des Silos mit erfasst wurde. Die einzelnen Chargen der Sandproben wurden durch Siebung (Bild 6) sowie die Bestimmung der Sandfeuchte, die zwischen 1,8 M.-% und 6,9 M.-% variierte, charakterisiert. Die Körnungsziffer der Sandchargen variierte zwischen 1,23 und 1,71. Die Mehlkorngehalte (< 0,125 mm) lagen zwischen 0,91 M.-% und 2,57 M.-%

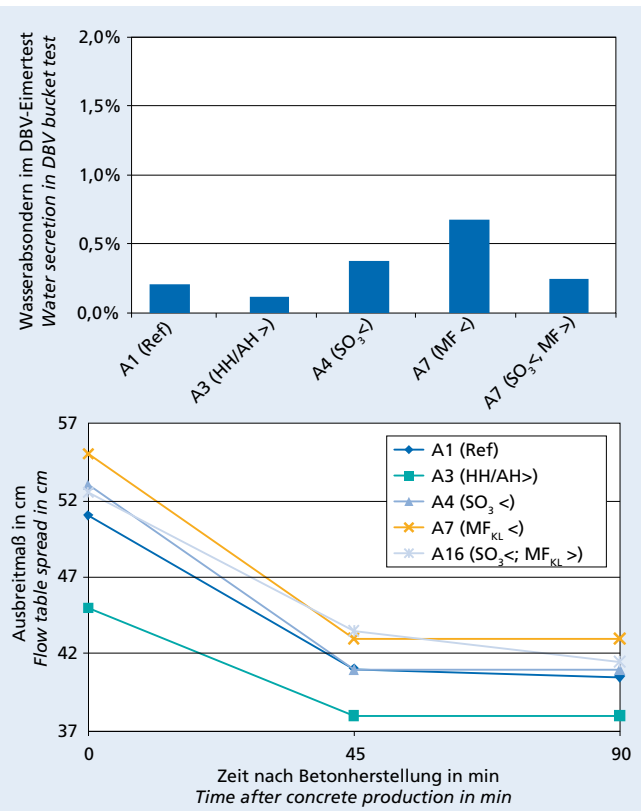


Bild 5: Wasserabsondern und zeitliche Entwicklung der Konsistenz und des Wasserabsonderns von Betonen gleicher Zusammensetzung (Leimgehalt ca. 300 l/m³) bei labortechnischer Veränderung der Eigenschaften des verwendeten Zements (Zementgehalt 340 kg/m³, Flugaschegehalt 51 kg/m³, Wasserhalt 167 kg/m³, w/z_{eq} = 0,46, Sieblinie B16, Fließmittel PCE)

Figure 5: Water secretion and change with time of the consistency and water secretion of concretes with the same composition (paste content approx. 300 l/m³) during laboratory changes to the properties of the cement used (cement content 340 kg/m³, fly ash content 51 kg/m³, water content 167 kg/m³, w/c_{equiv} = 0.46, grading curve B16, PCE superplasticizer)

especially the workability. It was also established in practice that the tendency of the concrete towards sedimentation and bleeding can also increase with decreasing fine fraction in the sand [10]. Multiple sampling of the fine aggregate (Rhine sand 0 to 2 mm) and the superplasticizers (two different PCE superplasticizers) was carried out directly from the respective deliveries at a ready-mixed concrete plant over a period of about a year in order to record the fluctuations that normally occur in the composition of these concrete constituents. The sand samples (in each case from the same supply plant) were taken from the silo in the ready-mixed concrete plant; the filling level of the silo was also recorded. The individual batches of the sand samples were characterized by screening (Fig. 6) and determination of the sand moisture, which lay between 1.8 and 6.9 mass %. The k value of the sand batches varied between 1.23 and 1.71. The flour-fines content (< 0.125 mm) lay between 0.91 and 2.57 mass %, and the proportion of fines (< 0.25 mm) lay between 10.2 and 23.1 mass %. In some cases these values therefore differed significantly. No relationship could be detected between these characteristic values and the sand moisture or the filling level in the silo when the samples were taken. The two PCE superplasticizers from one producer that were used were each stored at the ready-mixed concrete plant in 1000 kg containers from which the different batches were sampled. The superplasticizer samples were analyzed by determining the solids content and by infrared spectroscopy. No significant changes in solids content or composition were found.

The concretes that had been classified as sensitive in the first working step were produced again with the freshly sampled constit-

und die der Feinanteile ($< 0,25$ mm) zwischen 10,2 M.-% und 23,1 M.-%. Teilweise unterschieden sich diese somit deutlich. Ein Zusammenhang dieser Kennwerte zur Sandfeuchte oder dem Füllstand des Silos zum Zeitpunkt der Probenentnahme konnte nicht festgestellt werden. Die beiden verwendeten PCE-Fließmittel eines Herstellers wurden im Transportbetonwerk in jeweils 1000 kg fassenden Containern gelagert, aus denen die verschiedenen Chargen beprobt werden konnten. Die Fließmittelproben wurden durch die Bestimmung des Feststoffgehaltes sowie mittels Infrarotspektroskopie analysiert. Dabei konnten keine signifikanten Veränderungen der Feststoffgehalte oder der Zusammensetzung festgestellt werden.

Die im ersten Arbeitsschritt als sensibel eingestufteten Betone wurden mit den neu beprobten Ausgangsstoffen wiederholt hergestellt und analog dazu geprüft. Hierbei wurde entweder die Sand- oder Fließmittelcharge variiert, während die jeweils andere Ausgangskomponente aus der originären Charge, die bereits im ersten Arbeitsschritt verwendet wurde, stammte. So war sichergestellt, dass potenzielle Schwankungen der Frischbetoneigenschaften aus den verschiedenen Sandchargen nicht durch das Fließmittel verursacht wurden und umgekehrt.

In Bild 7 ist die Konsistenzentwicklung der Betone mit einem Leimgehalt von ca. 300 l/m^3 (M1) bzw. 275 l/m^3 (M2) unter Variation der jeweiligen Fließmittelcharge dargestellt. Es zeigte sich, dass die Ausbreitmaße 5 min nach Wassergabe beim Beton-M1 nahezu identisch waren, während diese beim Beton-M2 bereits eine Streubreite von bis zu 10 cm aufwiesen. Die Streubreite der Ausbreitmaße setzte sich beim Beton-M2 über die Zeit nahezu gleichmäßig fort, während die Ausbreitmaße bei den verschiedenen Mischungen von Beton-M1 erst nach 45 min (vgl. M1 – FM 11/12 und M1 – FM 02/14) stärker voneinander abwichen. Die Konsistenz der leimreicheren M1-Betone, mit Ausnahme der beiden Betone M1 – FM 02/14 sowie M1 – FM 03/14 nach 90 min, entwickelte sich bei Variation der Fließmittelcharge vorhersehbarer im Vergleich zu den M2-Betonen.

Wie in Bild 8 dargestellt, wurde die angestrebte Ausgangskonsistenz (Ausbreitmaß von ca. 55 cm) von fast allen M1-Betonen mit Sanden aus den verschiedenen Lieferchargen zielsicher erreicht. Das Ausbreitmaß unmittelbar nach Mischzeitende lag zwischen 52 und 57 cm (Ausnahme: Beton M1 – S 10/13) und somit im zulässigen Toleranzbereich nach DIN EN 206 und DIN 1045-2 von ± 3 cm. Das Ausbreitmaß der Betone-M2 zu diesem Prüfzeitpunkt variierte zwischen 51 und 58 cm geringfügig mehr. Die Unterschiede zwischen den beiden Betonen M1 und M2 machten sich

uents and tested in the same way. Either the sand batch or the superplasticizer batch was varied while each of the other constituents came from the original batch that had already been used in the first step. In this way it was established that potential fluctuations in the properties of the fresh concrete made from the various sand batches were not caused by the superplasticizer and vice versa.

The change in consistency of the concretes with a paste content of approx. 300 l/m^3 (M1) or 275 l/m^3 (M2) on varying the particular superplasticizer batch is shown in Fig. 7. It was found that the flow table spreads 5 minutes after adding the water were virtually identical for the M1 concretes while they exhibited a range of up to 10 cm with the M2 concretes. The range of the flow table spreads carried on virtually uniformly with time for the M2 concretes but the flow table spreads for the different M1 concrete mixes only differed sharply from one another after 45 min (cf. M1 – FM 11/12 and M1 – FM 02/14). With the exception of the two concretes M1 – FM 02/14 and M1 – FM 03/14 after 90 min, the consistency of the paste-rich M1 concretes changed more predictably than with the M2 concretes when the superplasticizer batch was varied.

Fig. 8 shows that the target starting consistency (flow table spread of about 55 cm) was achieved dependably by almost all the M1 concretes made with sand from the different supply batches. The flow table spread immediately after the end of mixing lay between 52 and 57 cm (exception: concrete M1 – S 10/13) and therefore lay within the permissible tolerance range of ± 3 cm specified in DIN EN 206 and DIN 1045-2. The flow table spread of the M2 concretes at this test time varied slightly more between 51 and 58 cm. The differences between the two concretes (M1 and M2) were noticeable mainly in their stiffening behaviour. The decrease in consistency of the M1 concretes with time was virtually uniform but with the M2 concretes it could only be predicted to a limited extent. About 70 % of the mixes investigated registered a fairly sharp drop in consistency between 5 and 45 min while with the rest of the concrete compositions the loss of consistency took place mainly between 45 and 90 min (e.g. M2 – Ref or M2 – S 31/03/14). This means that the concretes with increased paste content that were investigated also exhibited the expected fresh concrete properties when the concrete constituents were altered and could therefore be classified as “robust” (Figs. 5, 7 and 8).

The flow table spread 90 min after the addition of water and the quantity of bleed water measured in the DBV bucket test are compared in Fig. 9 with the proportion of fines (< 0.25 mm) in the aggregate. A trend can be seen in which, on average, smaller quantities of bleed water were measured with increasing fines content

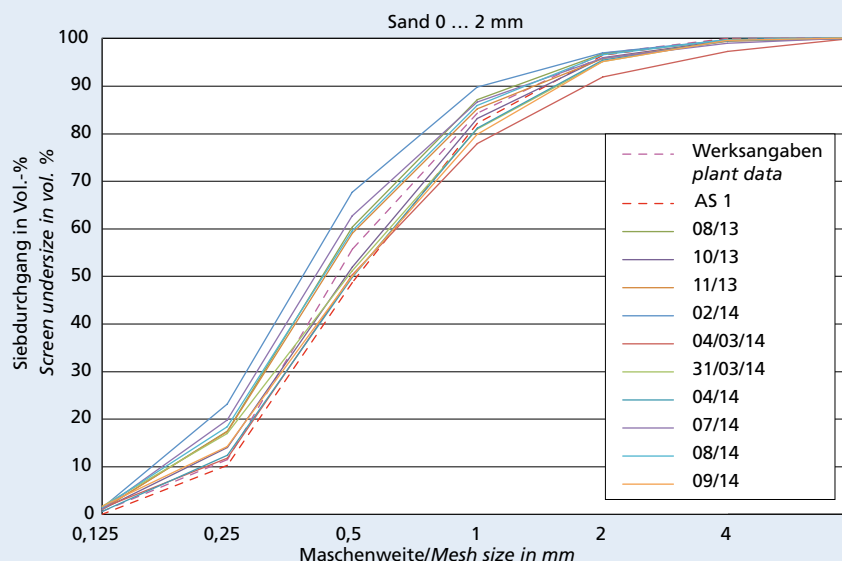


Bild 6: Sieblinien der Sandchargen
Figure 6: Grading curves of the sand batches

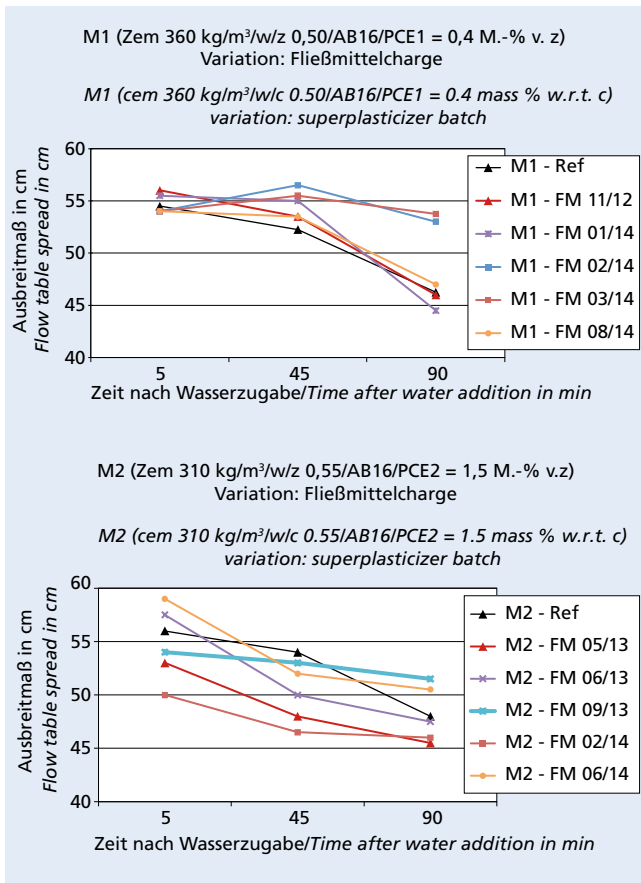


Bild 7: Zeitliche Entwicklung der Konsistenz von Betonen M1 (Leimgehalt ca. 300 l/m³) und M2 (Leimgehalt ca. 275 l/m³) bei Variation der Fließmittelcharge (Zement: CEM II/B-S 42,5 N)

Figure 7: Change with time of the consistency of concretes M1 (paste content approx. 300 l/m³) and M2 (paste content approx. 275 l/m³) on varying the superplasticizer batch (cement: CEM II/B-S 42,5 N)

vor allem in ihrem Ansteifverhalten bemerkbar. Während die zeitliche Abnahme der Konsistenz der M1-Betone nahezu einheitlich war, lies sie sich bei den M2-Betonen nur bedingt vorhersagen. Rd. 70 % der untersuchten Mischungen verzeichneten einen stärkeren Abfall der Konsistenz zwischen 5 und 45 min, während bei den restlichen Betonzusammensetzungen der Konsistenzverlust vor allem zwischen 45 und 90 min stattfand (z. B. M2 – Ref oder M2 – S 31/03/14). Die untersuchten Betone mit erhöhtem Leimgehalt zeigten also auch bei einer Veränderung der Betonausgangsstoffe erwartungsgemäße Frischbetoneigenschaften und konnten somit als „robust“ eingestuft werden (Bilder 5, 7 und 8).

Ergänzend sind in Bild 9 die Ausbreitmaße zum Zeitpunkt 90 min nach Wasserzugabe sowie die im DBV-Eimertest ermittelten Blutwassermengen den Feinanteilen der Gesteinskörnung (< 0,25 mm) gegenübergestellt. Es ist tendenziell erkennbar, dass mit steigendem Feinanteilgehalt der Gesteinskörnung im Mittel geringere Blutwassermengen ermittelt wurden und gleichzeitig die ermittelten Ausbreitmaße 90 min nach Wasserzugabe abnahmen.

3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass bei weichen Betonen mit geringen Leimgehalten bei einer Veränderung der Betonausgangsstoffe vermehrt mit dem Auftreten folgender unerwarteter Phänomene gerechnet werden muss:

- nicht vorhersehbare deutliche Unterschiede bei der abgesonderten Wassermenge im DBV-Eimertest (Bluten)
- unkontrollierte Nachverflüssigung der Betone, also weichere Konsistenzen mit fortschreitender Zeit
- ungeplante erhöhte Luftgehalte im Frischbeton
- einem beschleunigten Ansteifverhalten

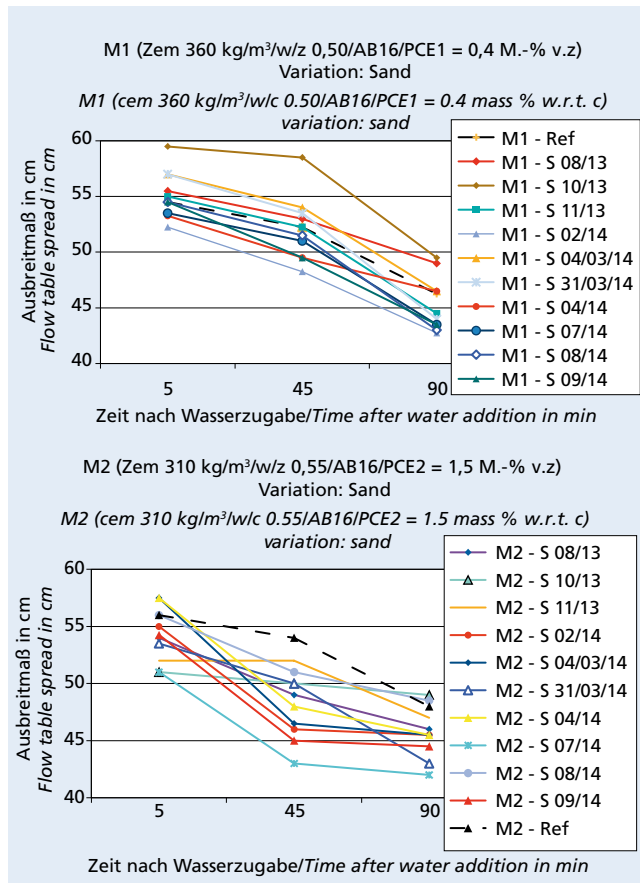


Bild 8: Zeitliche Entwicklung der Konsistenz von Betonen M1 (Leimgehalt ca. 300 l/m³) und M2 (Leimgehalt ca. 275 l/m³) bei Variation der Sandcharge (Zement: CEM II/B-S 42,5 N)

Figure 8: Change with time of the consistency of concretes M1 (paste content approx. 300 l/m³) and M2 (paste content approx. 275 l/m³) on varying the sand batch (cement: CEM II/B-S 42,5 N)

of the aggregate and at the same time there was a drop in the flow table spread measured 90 min after the addition of water.

3 Summary

The results of the research project show that with soft concretes containing low levels of paste the occurrence of the following unexpected phenomena must be expected to an increased extent if there is a change in the concrete constituents:

- significant, unpredictable differences in the quantity of water secreted in the DBV bucket test (bleeding)
- uncontrolled re-plasticizing of the concretes, i.e. softer consistencies with advancing time
- unplanned increased air content in the fresh concrete
- accelerated stiffening behaviour

It became apparent that these phenomena can appear not only if there is a change in cement properties, such as may occur in practise, but also when choosing a different batch of the same aggregate or the same superplasticizer used. The occurrence of unexpected changes in fresh concrete properties can be very largely avoided by increasing the paste content.

Certain fluctuations in the properties of the concrete constituents due to normal large-scale production are inevitable, so they must be taken into consideration in the concrete design to ensure predictable fresh concrete properties over long periods. Excessive reduction in the binder and paste content in the concrete, which is supposedly possible through the development of efficient superplasticizers, can be the cause of unexpected fresh concrete properties and less robust concretes.

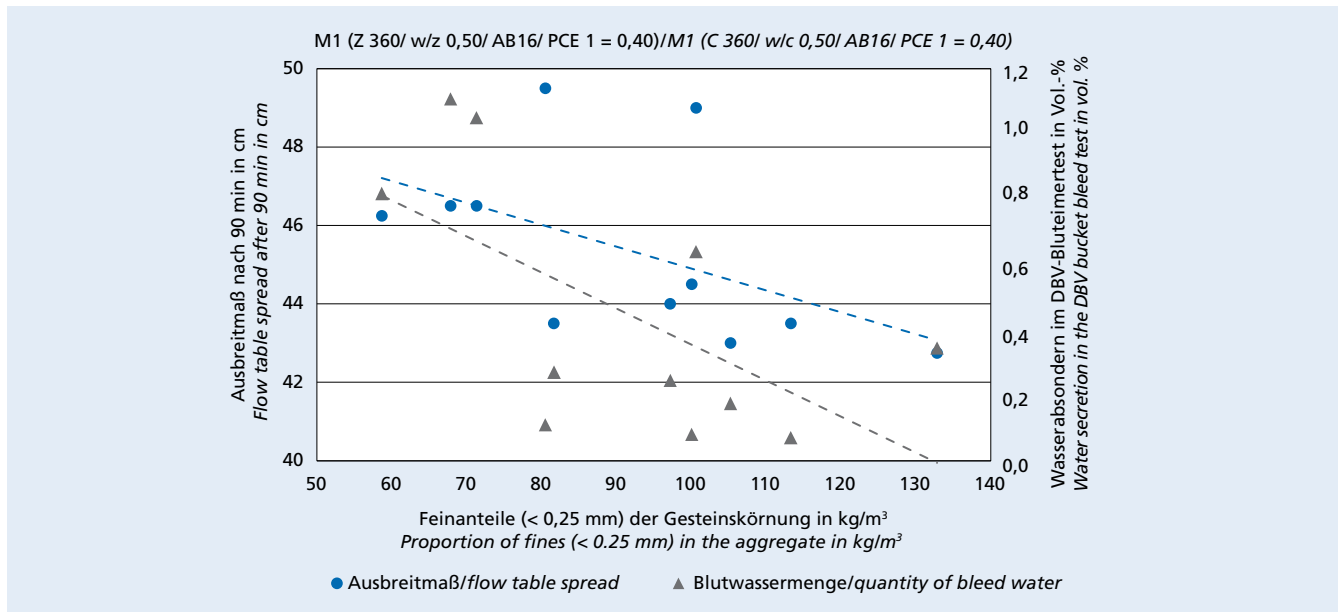


Bild 9: Korrelation der Blutwassermenge und der Konsistenz mit den Feinanteilen der Gesteinskörnung am Beispiel der Betonzusammensetzung M1 (Zement: CEM II/B-S 42,5 N)

Figure 9: Correlation of the quantity of bleed water and the consistency with the proportion of fines in the aggregate using the example of the M1 mix formulation (cement: CEM II/B-S 42,5 N)

Dabei zeigte sich, dass diese Phänomene sowohl bei einer praxisüblichen Veränderung von Zementeigenschaften als auch bei der Wahl einer anderen Charge der gleichen Gesteinskörnung oder des gleichen verwendeten Fließmittels auftreten können. Durch eine Erhöhung des Leimgehalts konnte das Auftreten unerwarteter Änderungen der Frischbetoneigenschaften weitestgehend vermieden werden.

Da gewisse Schwankungen der Eigenschaften der Betonausgangsstoffe aus marktüblicher großtechnischer Produktion unvermeidbar sind, muss dies beim Betonentwurf berücksichtigt werden, um vorhersehbare Frischbetoneigenschaften über längere Zeiträume sicherzustellen. Eine übermäßige Reduzierung des Bindemittel- und Leimgehalts im Beton, welche durch die Entwicklung leistungsfähiger Fließmittel vermeintlich ermöglicht wird, kann die Ursache für unerwartete Frischbetoneigenschaften und wenig robuste Betone sein.

Literatur / Literature

- [1] Moderne Fließmittel in der Betontechnologie – Herstellung und Verwendung von Beton mit PCE. Deutsche Bauchemie e.V., Informationsschrift, 1. Ausgabe, Frankfurt 2007
- [2] Gleichmäßige Frischbetoneigenschaften unter schwierigen Randbedingungen – sind „moderne“ Betone zu empfindlich für die Praxis? HeidelbergCement, Newsletter Technik, Nr. 18, Oktober 2013
- [3] Westendarp, A.: Probleme mit der Mischungsstabilität von Beton, BAW-Brief 01/2015
- [4] DIN EN 12350-5, Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009
- [5] DAfStb-Richtlinie für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit, Ausgabe November 2006
- [6] DBV-Merkblatt Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton, Fassung Januar 2014
- [7] DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ausgabe September 2012
- [8] DIN EN 12350-7, Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009
- [9] Geisenhanslücke, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Dissertation, Kassel University Press, Kassel 2009
- [10] Bose, T.; Hemrich, W.: Sichtbeton beim Bau der Richard Rother Realschule in Kitzingen. Beton-Informationen (2006) H. 6, S. 99–109

Christoph Müller, Düsseldorf, und Udo Wiens, Berlin

Betonbau im Wandel

Concrete construction in a state of flux

Übersicht

„Panta rhei – Alles fließt.“ Dieses dem griechischen Philosophen Heraklit zugeschriebene Zitat scheint die aktuell stattfindenden Veränderungen im Umfeld der Regelwerkssetzung für die Betonbauweise und den Baustoff Beton treffend zu beschreiben. Im Jahr 2015 veranstaltete der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) zwei Fachkolloquien und ein Rundgespräch zu den Themen „Widerstandsklassen – das neue Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken“, „EuGH-Urteil C-100/13 – Folgen für die Wertschöpfungskette im Betonbau“ sowie „Neues Konzept zur Betonbauqualität“. Jedes Thema für sich ist bereits hochkomplex und beschreibt zudem einen potenziellen Paradigmenwechsel. Aber: Handelt es sich dabei um isolierte Handlungsstränge oder folgen sie der bekannten Erkenntnis, dass „Alles mit Allem zusammenhängt“? Die Autoren des Beitrags wagen eine Antwort auf diese Frage und zeigen auf, welche technischen und bauordnungsrechtlichen Aspekte bei der Umsetzung von Performance-Konzepten Berücksichtigung finden müssen.

1 Einleitung

Die aktuelle Generation der Betonnormen, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, enthält zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Baustoffs „Beton“ ein System aus deskriptiven Anforderungen (z.B. höchstzulässige Wassermenge, Mindestzementgehalte usw.) und Klassen (z.B. Expositionsklassen, Konsistenzklassen, Druckfestigkeitsklassen). Mit dem heutigen komplexen Fünfstoffsystem „Beton“, bestehend aus Gesteinskörnung, Zement, Wasser, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln lassen sich vielfältige Bauaufgaben bewältigen. Trotz der Vielzahl möglicher Kombinationen aus Zementen, Zusatzmitteln und Betonzusätzen ist dieses System grundsätzlich robust und wenig anfällig für Fehlanwendungen. Mit Blick auf die Dauerhaftigkeit stößt dieses System in einigen Fällen an seine Grenzen:

- Eine Mindestlebensdauer >> 50 Jahre ist nachzuweisen (z.B. ZTV-W)
- Neue Baustoffe bzw. Baustoffe ohne Langzeiterfahrung sollen zur Anwendung kommen (z.B. Zulassungsverfahren)
- Es liegen besondere Umgebungsbedingungen/Beanspruchungen vor (z.B. AKR im Betonstraßenbau)

Ein wesentlicher Aspekt, warum die EN 206 bis zum heutigen Tag nicht harmonisiert ist, sind die Regelungen zur Dauerhaftigkeit des Betons. Eine einheitliche europäische Basis zur Bewertung der Dauerhaftigkeit von Beton konnte bis heute nicht erreicht werden. Hier setzt das Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken durch die europäische Definition von Widerstandsklassen an.

Die jüngere Erfahrung mit der Anwendung der bestehenden Betonnormen hat gezeigt, dass die vorhandenen Regelungen und Prüfungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften offenbar nicht für alle Anwendungssituationen ausreichen, um zielsicher über die Planungsphase, die Betontechnik und die Ausführung die erforderliche Betonbauqualität zu erreichen. Damit verbunden hat in Deutschland eine Debatte zu der Frage begonnen, bei welchen Bauaufgaben das Anforderungsprofil der (nicht harmonisierten) Betonnorm EN 206 ausreicht und in welchen Fällen zusätzliche Anforderungen nötig sind. Hieraus erwächst der Ansatz des neuen Konzepts zur Betonbauqualität.

Abstract

„Panta rhei – everything flows“. This quotation, which is attributed to the Greek philosopher Heraclitus, seems to be an accurate description of the changes currently taking place in relation to the setting of regulations for building with concrete and for concrete as a building material. In 2015 the DAfStb (German Committee for Structural Concrete) organized two technical seminars and a round-table discussion on the topics of „Resistance classes – the new concept for ensuring the durability of concrete structures“, „CJEU judgement C-100/13 – consequences for the value-added chain in concrete construction“ and „New concept for quality of concrete construction“. Each topic is already in itself highly complex and also describes a potential paradigm shift. However: is it a matter of isolated lines of action or is it following the familiar rationale that „everything is connected to everything“? The authors of this article venture to answer this question and indicate those technical and building regulation aspects that must be borne in mind when implementing performance concepts.

1 Introduction

The current generation of concrete standards, DIN EN 206-1 and DIN 1045-2, contains a system of descriptive requirements (e.g. maximum water/cement ratio, minimum cement content, etc.) and classes (e.g. exposure classes, consistency classes, compressive strength classes) for describing the performance of concrete as a construction material. With concrete in its current form as a complex five-component system, consisting of aggregate, cement, water, additions and admixtures, it is possible to cope with a variety of construction projects. In spite of the large number of possible combinations of cements, admixtures and concrete additions this system is basically robust and is not readily susceptible to incorrect application. In some cases this system comes up against its limits with respect to durability:

- A minimum service life >> 50 years has to be proved (e.g. infrastructural buildings)
- New building materials or building material for which there is no long-term experience are to be used (e.g. approval procedures)
- There are special ambient conditions/stresses (e.g. ASR in concrete road construction)

One important aspect of why EN 206 has not yet been harmonized is the regulations on the durability of concrete. It has not yet been possible to reach a uniform European basis for evaluating the durability of concrete. This is where the concept of ensuring the durability of concrete structures through the European definition of resistance classes comes in.

Recent experience with the application of the existing concrete standards has shown that the present regulations and tests for fresh and hardened concrete properties are apparently not sufficient for all application situations to achieve the requisite quality of concrete construction dependably through the design phase, concrete technology and execution. In this connection a debate has started in Germany about the question of the construction projects for which the requirement profile of the (non-harmonized) concrete standard EN 206 is sufficient and the cases for which additional requirements are needed. This forms the basis of the approach of the new concept of concrete construction quality.

Neben technischen Aspekten spielen manchmal auch „andere Begleitumstände“ eine Rolle, die zu Veränderungen in der „Normenlandschaft“ führen. Mit dem Urteil in der Rechtssache C-100/13 hat der Europäische Gerichtshof (EuGH) verdeutlicht, dass zusätzliche Anforderungen an CE-gekennzeichnete Bauprodukte, wie in den deutschen Bauregellisten aufgeführt, unzulässige Handelshemmnisse darstellen und somit gegen europäisches Recht verstoßen.

Der Beitrag gibt einen Überblick der wesentlichen Fragestellungen in den drei Themenfeldern und stellt im Anschluss heraus, welche Aspekte übergreifend zu diskutieren und zu lösen sind. Neben den explizit in Bezug genommenen Quellen werden nachfolgend Informationen/Textpassagen aus [1, 2, 3] verwendet.

2 Widerstandsklassen für Beton

Ansprüche an die Dauerhaftigkeit von Beton sind in der bestehenden europäischen Betonnorm EN 206 durch Expositionsklassen („genormte Umgebungsbedingungen“) definiert, die durch nationale Anforderungen umgesetzt werden. Eine CEN-Arbeitsgruppe hat damit begonnen, Dauerhaftigkeits- bzw. Widerstandsklassen für Betone zu definieren, um ggf. zu einer europaweit vergleichbaren Definition der Leistungsfähigkeit von Beton bzgl. seiner Dauerhaftigkeit zu kommen. Erste Vorschläge für Klassen basieren auf Ergebnissen aus Lebensdauerbemessungen.

Bei den aus der Lebensdauerbemessung nach der ISO 16204:2012 „Durability – Service life design of concrete structures“ abgeleiteten Widerstandsklassen, die derzeit insbesondere für die Expositionsklassen XC, XS und XD vorgesehen sind, wird die Eindringgeschwindigkeit der Carbonatisierungs- oder Chloridfront in den Beton zugrunde gelegt. Eine 50-jährige Nutzungsdauer angenommen, bedeutet dann z.B. eine Widerstandsklasse RC40 bei Carbonatisierung, dass die Carbonatisierungsfrost nach 50 Jahren unter bestimmten Lagerungsbedingungen mit einer Annahmewahrscheinlichkeit von 90 % eine Tiefe von 40 mm nicht überschreitet. Das Einhalten dieser Kriterien der Widerstandsklasse kann dann durch deskriptive Festlegungen von Anforderungen an die Betonzusammensetzung (Zementart, Zusatzstoffe, Wasserzementwert) oder durch eine Performanceprüfung des Betons (z.B. Ermittlung des Carbonatisierungswiderstands) bzw. seiner Ausgangsstoffe nachgewiesen werden. Der Tragwerkplaner könnte dann durch entsprechende Wahl einer Widerstandsklasse die Mindestbetondeckungen variieren (Bild 1).

Vergleicht man die Dauerhaftigkeits- bzw. Widerstandsklassen (z.B. bei Carbonatisierung) und deren Verwendungsmöglichkeiten mit der derzeitigen Regelung in DIN 1045-2 bzw. in bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen, wird deutlich, dass die

Alongside the technical aspects, „other attendant circumstances“ sometimes also play a part and lead to changes in the „standard landscape“. With the judgement in the C-100/13 case the Court of Justice of the European Union (CJEU) has made it clear that additional requirements for building products with the CE mark of conformity, as quoted in the German building regulation lists, represent inadmissible barriers to trade and are therefore contrary to European law.

This article provides an overview of the essential issues in the three topical areas and then singles out which aspects have to be comprehensively discussed and solved. Information or text passages from [1, 2, 3] have been used below in addition to the sources that are explicitly referred to.

2 Resistance classes for concrete

Requirements for the durability of concrete are defined in the existing European concrete standard EN 206 by exposure classes („standardized ambient conditions“) that are implemented through national requirements. A CEN working group has started to define durability and resistance classes in order, if possible, to come to a definition of the performance of concrete with respect to its durability that is comparable throughout Europe. Initial recommendations for classes are based on results from service life calculations.

The rate of penetration of the carbonation or chloride front in the concrete is taken as the basis in the resistance classes that were derived from the service life calculations in accordance with ISO 16204:2012 „Durability – service life design of concrete structures“ and are currently intended specifically for exposure classes XC, XS and XD. Assuming a service life of 50 years a RC40 resistance class for carbonation then means, for example, that under certain storage conditions there is a 90 % probability that the carbonation front will not have exceeded a depth of 40 mm after 50 years. Compliance with these resistance class criteria can then be verified by descriptive stipulation of requirements for the concrete composition (cement type, additions, water/cement ratio) or by testing the performance of the concrete (e.g. determination of the carbonation resistance) and of its constituents. The designer could then vary the minimum concrete cover by appropriate choice of a resistance class (Fig. 1).

If the durability resistance classes (e.g. for carbonation) and their possible applications are compared with the current regulations in DIN 1045-2 or in technical approval procedures it is clear that the classification would lead to a differentiation of the current evaluation background. For example, some – currently well established – types of concrete would probably be only admitted to a class with high carbonation resistance by adjusting the concrete technology

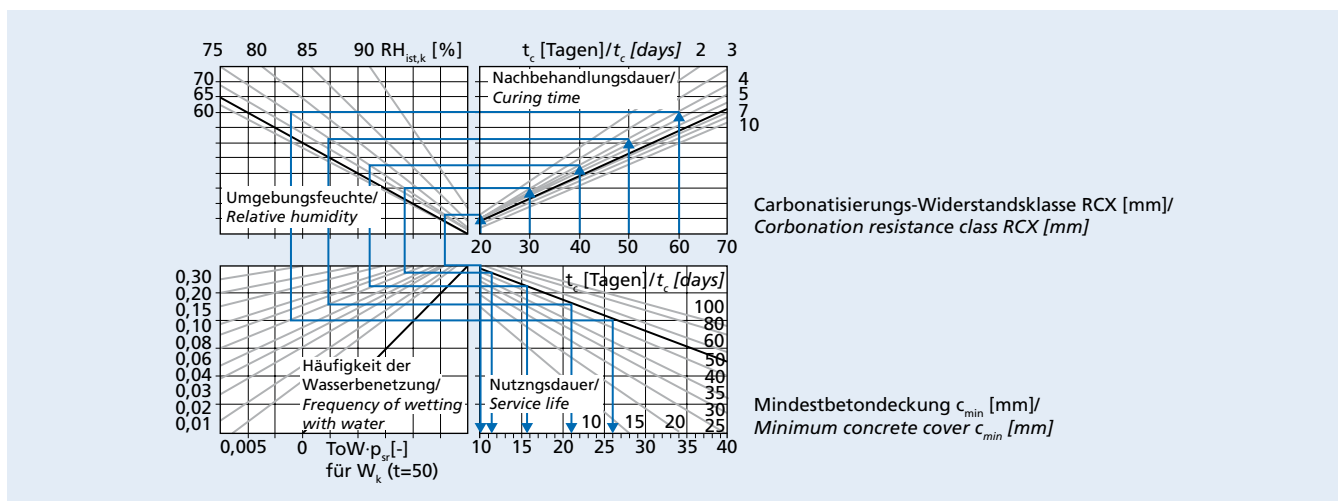


Bild 1: Zusammenhang zwischen Carbonatisierungs-Widerstandsklasse, Nachbehandlungsdauer, Umgebungsfeuchte, Häufigkeit der Wasserbenetzung und Mindestbetondeckung nach [4]

Figure 1: Relationship between carbonation resistance class, curing time, relative humidity, frequency of wetting with water and minimum concrete cover according to [4]

Klasseneinteilung zu einer Differenzierung des heutigen baulich-sichtlichen Bewertungshintergrunds führen würde. So würden z.B. einige – heute gängige – Zementarten Zugang in eine Klasse mit hohem Carbonatisierungswiderstand voraussichtlich nur über eine Anpassung der betontechnischen Randbedingungen (z.B. Absenkung des Wasserzementwerts oder Erhöhung der Betondeckung) erhalten. Unklar ist, wie der Planer mit der Option umgehen würde, eine „Kompensationsmöglichkeit“ zwischen Betonqualität und Betondeckung zur Verfügung zu haben und wie sichergestellt werden kann, dass im Bauteil Betonqualität und Betondeckung zusammenpassen. Mit der Auswahl einer bestimmten Klasse würde der Planer eine „Vorauswahl“ der Betonausgangsstoffe treffen. Im günstigsten Fall tut er dies bewusst unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Betonausgangsstoffe in der Region und bei Ansatz vernünftiger Transportentfernungen. Im ungünstigsten Fall berücksichtigt er dies nicht bzw. ist sich der Tragweite seiner Entscheidung gar nicht bewusst. Auch hier hängt somit das Gelingen des Konzepts von einer angemessenen Kommunikation und vom Wissensstand entlang der gesamten Wertschöpfungskette ab. Auf der anderen Seite ließe sich bei Definition von Dauerhaftigkeitsklassen in der Zukunft ggf. eine Anbindung an ein Dauerhaftigkeitspotenzial von Zementen auf europäischer Ebene realisieren (vgl. z.B. „Ermittlung hydrationsgradbasierter Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton“ in [5]). Chancen und Risiken des Systems für die Praxis (z.B. eine weitere Erhöhung der Komplexität des Regelwerks und eine Verlagerung des Nachweises des Dauerhaftigkeitspotenzials eines Betons in Richtung des Betonherstellers) müssen also zunächst abgewogen werden.

3 Konzept zur Betonbauqualität

Zement und Beton haben sich seit Jahrzehnten insbesondere deshalb bewährt, weil die Qualitätsüberwachung für Herstellung und Verwendung lückenlos geregelt ist und den Anforderungen an sichere und dauerhafte Bauwerke genügt. In einigen wenigen Anwendungsfällen gibt es aber Zweifel, ob alle beton- und ausführungstechnisch notwendigen Parameter eindeutig beschrieben und bereits in der Planung angemessen berücksichtigt sind. Vor diesem Hintergrund hatte die Analyse der Stellungnahmen zum Entwurf der DIN 1045-2:2014-08 zum Teil gegensätzliche Sichtweisen von Bauherren, Bauausführenden und Betonherstellern gezeigt. Hinzu kommt, dass bisher in Deutschland die Öffnungsklauseln der DIN EN 206 großzügig genutzt wurden, um im nationalen Anwendungsdokument alle aus nationaler Sicht erforderlichen Festlegungen einzubringen, die für das Erreichen einer hohen Betonbauqualität erforderlich sind. Dieser Weg ist zukünftig – auch als indirekte Folge des in Abschnitt 4 erläuterten EuGH-Urteils – auf normativer Ebene nicht mehr möglich. Der Entwurf der DIN 1045-2:2014-08 als Anwendungsdokument zur DIN EN 206:2014-07 konnte daher Ende 2014 nicht im Konsens verabschiedet werden. In der Folge hat man sich nun das Ziel gesetzt, in einem durchgehenden Konzept umfassende und konsistente Festlegungen von bauteilspezifischen Anforderungen an Planung, Baustoffe, Ausführung und Qualitätssicherung zu gestalten. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton DAfStb ist die Plattform, die dafür erforderlichen Vorgespräche zu führen. Deren Ergebnisse sollen gemäß Vorstandsbeschluss in eine DAfStb-Richtlinie münden.

3.1 Ausgangssituation

In vielen Fällen des allgemeinen Hochbaus dürften die Regelungen der neuen DIN EN 206:2014-07 mit einer DIN 1045-2 ausreichen, in der ausschließlich die zulässigen Öffnungsklauseln in der europäischen Norm genutzt werden. Aber die z.B. bei Brücken und Wasserbauten deutlich längeren planerischen Nutzungsdauern stellen weitaus höhere Anforderungen, die nur durch ein erweitertes Konzept zur Betonbauqualität erreicht werden können. Auch die Entwicklungen in der Betontechnologie hin zu dem bereits beschriebenen „Fünfstoffsystem“ mit einem breiten Spektrum an Druckfestigkeitsklassen, die auf der einen Seite die Verarbeitbarkeit verbessern und die Einsatzbereiche von Beton erweitern, auf der anderen Seite aber auch die Betone z. T. empfindlicher machen, zwingen zu neuen Konzepten. Öffentliche Bauherren und

(e.g. by lowering the water/cement ratio or increasing the concrete cover). It is not clear how the designer would deal with the option of being able to “compensate” between concrete quality and concrete cover and how it can be ensured that the concrete quality and concrete cover in the building are compatible. By choosing a specific class the designer would “preselect” the concrete constituents. In the most favourable case he would do this consciously bearing in mind the availability of the concrete constituents in the region and with an estimation of reasonable transport distances. In the least favourable case he does not take this into account or is not even aware of the consequences of his decision. Here again the success of the concept depends on appropriate communication and on the standard of knowledge along the entire value-added chain. On the other hand, with definition of the durability classes it might be possible in future to achieve a link to the durability potential of cements at the European level (cf., for example, “Determination of characteristic values based on degree of hydration for predicting the durability of concrete” in [5]). The opportunities and risks of the system in practice (e.g. a further increase in the complexity of the regulations and a shift in the proof of the durability potential of a concrete towards the concrete producer) must therefore be weighed up first.

3 Concept of concrete construction quality

Cement and concrete have proved particularly successful for decades because quality control for their production and use has been closely regulated and the requirements for safe and durable structures have been satisfied. However, in a few applications there is doubt about whether all the necessary concrete technology and implementation parameters have been clearly described and appropriately taken into account in the design. Against this background the analysis of the positions taken up over the draft of DIN 1045-2:2014-08 has shown the sometimes conflicting viewpoints of building owners, contractors and concrete producers. Added to this is the fact that so far in Germany the opening clauses of EN 206 have been widely used to incorporate in the national application document all the stipulations that are required from the national point of view and that are needed to achieve a high quality of concrete construction. In future this route – also as an indirect consequence of the CJEU judgement explained in Section 4 – is no longer possible at the normative level. At the end of 2014 there was therefore no consensus for the adoption of the draft of DIN 1045-2:2014-08 as the application document for DIN EN 206:2014-07. As a consequence, the target has now been set to create comprehensive and consistent definitions of the requirements specific to structural elements for the design, building materials, execution and quality control in one consistent concept. The DAfStb (German Committee for Structural Concrete) is the platform for conducting the requisite preliminary talks. In accordance with a board decision their results should lead to a DAfStb guideline.

3.1 Initial situation

In many cases the regulations in the new DIN EN 206:2014-07 may well be sufficient with a DIN 1045-2 in which only the permissible opening clauses in the European standard are used. However, the significantly longer design service lives of, for example, bridges and hydraulic engineering structures, set far greater demands that can only be achieved by an extended concept of concrete construction quality. The developments in concrete technology towards the “five components system” already described with a wide spectrum of compressive strength classes that, on the one hand, improve the workability and extend the areas where concrete can be used but, on the other hand, sometimes also make the concretes more sensitive, are making new approaches essential. Public building owners and contractors are calling for better consideration of site-relevant concrete properties for sophisticated structural elements, construction methods and special types of concrete. Examples mentioned are, for instance, the tendency to segregation or the machining of frank surfaces not cast in formwork. This mainly affects complex civil engineering structures. However, there are also cases in normal

Bauausführende mahnen für anspruchsvolle Bauteile, Bauverfahren und besondere Betonarten eine bessere Berücksichtigung baustellenrelevanter Betoneigenschaften an. Angesprochen sind z.B. die Entmischungsneigung oder die Bearbeitbarkeit nicht geschalteter Flächen. Betroffen hiervon sind vor allem komplexe Ingenieurbauwerke. Aber auch im üblichen Hochbau gibt es Fälle, die eine bessere Abstimmung planerischer Vorgaben mit Betontechnologie und Bauausführung notwendig machen. Beispielhaft genannt seien realistische Angaben zur Zugfestigkeit nach Eurocode 2, Abschnitt 7.3.2, für die Ermittlung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite oder die Begrenzung der Durchbiegung und ihre Konsequenzen auf die Betonauswahl bzw. den E-Modul oder die Festigkeitsentwicklung.

3.2 Das Konzept

Ziel des neuen Konzepts ist es, je nach Bauwerkstyp bzw. Bauaufgabe Anforderungen und Maßnahmen zum Erreichen einer festgelegten Qualität festzulegen. Die Klassifizierung von Qualitätsanforderungen muss dabei alle Bereiche des Betonbaus (Planung, Baustoff, Ausführung) abdecken und ihre Wechselwirkungen berücksichtigen (Bild 2).

Der Planer soll mit dem Auftraggeber eine Betonbauqualitätsklasse (BBQ) festlegen, wobei eine spätere Änderung nur mit gegenseitiger Abstimmung möglich ist. Für einige Bereiche existieren bereits Regelungen, die die Interaktion zwischen Planung, Beton-technik und Ausführung definieren (z.B. DBV/VDZ-Merkblatt „Sichtbeton“, DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“). Auch die Klassensystematik gibt es zum Teil schon in erweiterter Form (z.B. in DIN EN 1990), allerdings fehlt z. T. eine sinnvolle Verknüpfung untereinander. Ziel und gleichermaßen Herausforderung ist es, eine angemessene Differenzierung bei gleichzeitiger Praxistauglichkeit zu erreichen. Dem Planer müssen geeignete Instrumente an die Hand gegeben werden, um mit angemessenem Aufwand zu einer Einstufung in eine Betonbauqualitätsklasse zu kommen. Derzeit sind drei solcher Klassen in der Diskussion und Bild 3 zeigt den ersten Entwurf eines Entscheidungsbaums, mit dessen Hilfe die Zuordnung vorgenommen werden könnte.

Gegebenenfalls kann der bekannte „Bauteilkatalog“ des InformationsZentrums Beton in das Konzept als ein weiteres Hilfsmittel für den Planer integriert werden.

Auf der Basis der BetonbauQualitäts-Klassen ergäben sich z.B.:

- Gebrauchstauglichkeitsmerkmale (Leistungsanforderungen) von Betonen für die Verwendungszwecke,
- Maßnahmen/Anforderungen des/für den Betonhersteller,
- Maßnahmen/Anforderungen des/für den Bauausführenden sowie gegebenenfalls Vorgaben für die

building construction that necessitate better coordination of design specifications with concrete technology and execution of the work. Realistic data on tensile strength as specified in Eurocode 2, Section 7.3.2, for determination of the minimum reinforcement for restricting the crack width or limiting the deflection and its consequences for the choice of concrete and its modulus of elasticity or the strength development can be mentioned as examples.

3.2 The concept

The aim of the new concept is, depending on the type of structure or construction project, to lay down requirements and procedures to achieve a specified quality. The classification of quality requirements must cover all areas of concrete construction (design, building materials, execution) and take their interactions into account (Fig. 2).

The designer, together with the client, should specify a concrete quality class to which any subsequent change can only be made with mutual agreement. Regulations that define the interaction between design, concrete technology and execution already exist for some areas (e.g. DBV/VDZ code of practice “Exposed concrete”, DAfStb guideline on “Massive concrete structural elements”). In some cases the classification system already exists (e.g. in DIN EN 1990), but there is sometimes a lack of appropriate intercorrelation. The aim and equally the challenge are to achieve appropriate differentiation with, at the same time, practical feasibility. The designer must be provided with suitable instruments with which, with appropriate effort, he can arrive at a classification in a concrete construction quality class. There are currently three such classes under discussion and Fig. 3 shows the first draft of a decision scheme with which the allocation could be undertaken.

It may be possible to integrate the well known “catalogue of structural elements” from the German “InformationsZentrum Beton (Concrete Information Centre)” into the concept as an additional aid for the designer.

The concrete construction quality classes could, for example, give rise to:

- Performance requirements for concretes for the designated purposes,
- Procedures/Requirements for the concrete producer,
- Procedures/Requirements for the contractors, and possibly provision for
- Concrete/contractor vs designer “feedback” (the “Concrete team”).

This therefore involves procedures along the entire value-added chain.

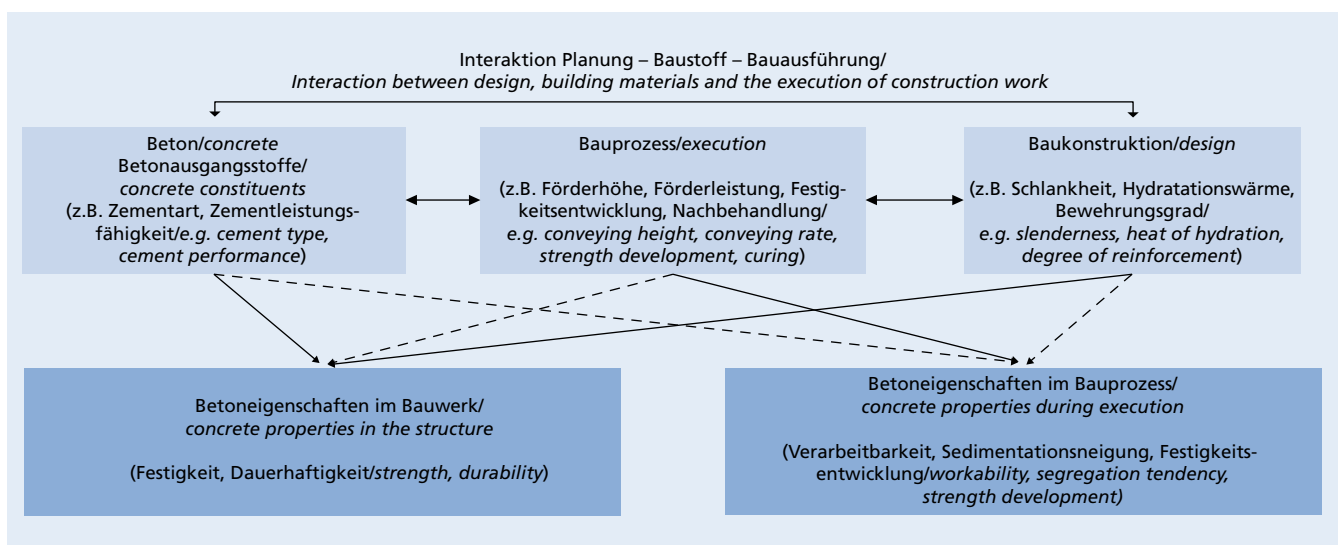


Bild 2: Interaktion Planung – Baustoff – Bauausführung

Figure 2: Interaction between design, building materials and the execution of construction work

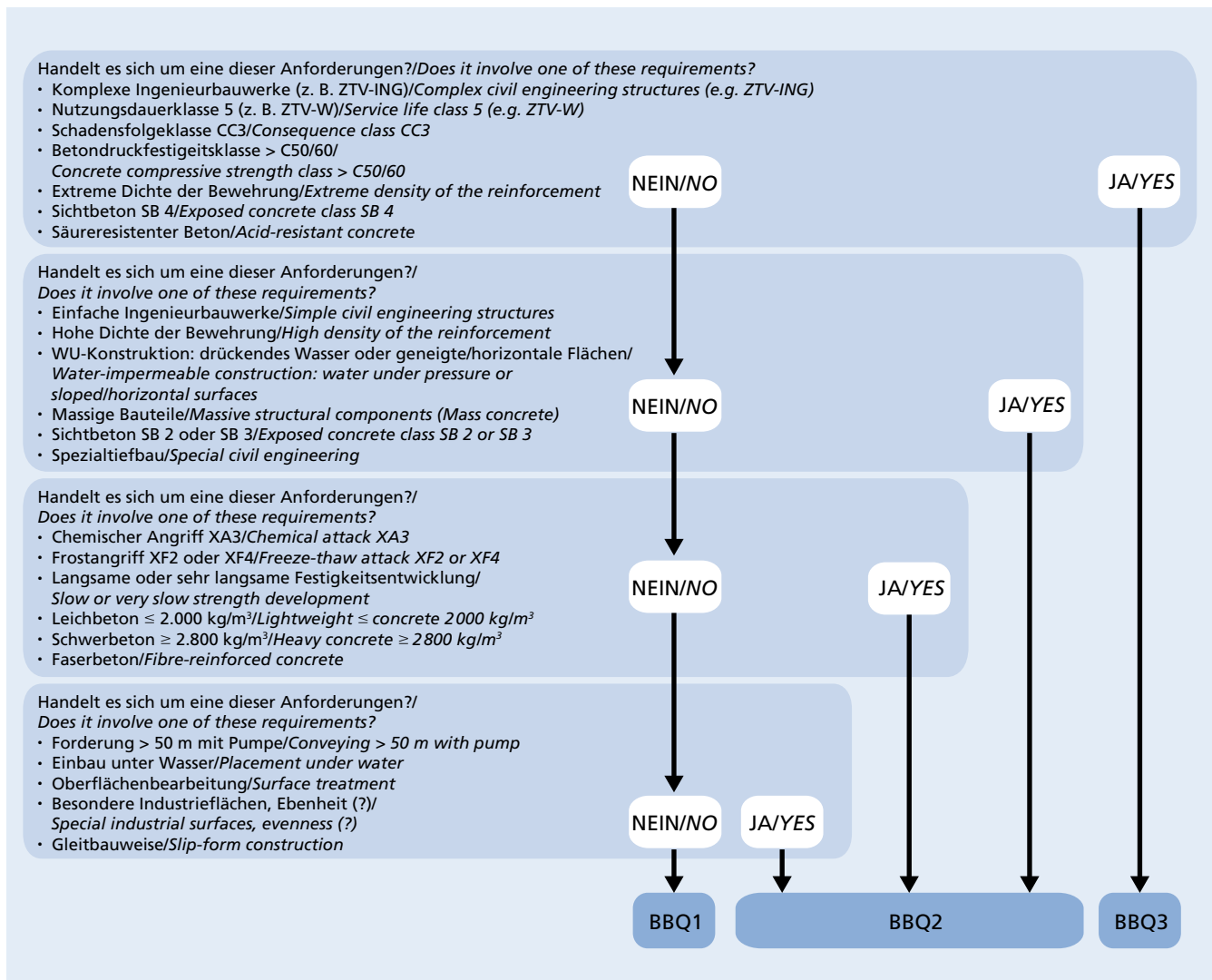


Bild 3: Konzept BetonBauQualität – Beantwortung von Fragen bedingt durch Planung, Baustoff und Bauausführung mit Einordnung in eine BetonBauQualitäts-Klasse
(Quelle: DAfStb AK Beton unter Berücksichtigung/Verwendung von Konzepten BTB/VDZ, DBV/VDZ und Prof. Breitenbücher)
Figure 3: Concrete construction quality concept – answering questions arising from design, building materials and construction work with assignment to a concrete construction quality class

(source: DAfStb Working Group "Concrete" bearing in mind / using concepts BTB/VDZ, DBV/VDZ and Prof. Breitenbücher)

■ „Rückkopplung“ Beton/Bauausführung vs. Planung („Beton im Team“).

Es handelt sich damit um Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Ein Beispiel sind erweiterte Erstprüfungen bzw. Eignungsprüfungen am Beton, bei denen – bauteil- bzw. anwendungsspezifisch – folgende Aspekte zu berücksichtigen sind:

- marktübliche Schwankungsbreite der Betonausgangsstoffe
- Einflüsse aus großtechnischer Betonherstellung wie z.B. praxisübliche Schwankungen im Wassergehalt
- Einflüsse aus dem Bauablauf, wie z.B. Temperatureinfluss oder Pumpstrecke

Auf diesem Weg können für anspruchsvolle Bauaufgaben robuste Frischbetoneigenschaften auch unter Baustellenbedingungen erzielt werden. Weitere Hinweise zu diesem Thema enthalten z.B. [6, 7].

Nicht alle Herausforderungen lassen sich aber über den Baustoff oder die Bauausführung meistern. Mit dem neuen Ansatz soll Planern auch vor Augen geführt werden, an welchen Stellen sie durch ihre Vorgaben (z.B. extreme Bewehrungsgehalte) anspruchsvolle Betontechnologie „auslösen“. Unter Einbeziehung von Planern sind seitens der Betonhersteller und Bauausführenden somit technische Strategien bzw. Leitlinien zu entwickeln, um Grenzen

An example of this is extended initial testing and suitability testing of the concrete for which the following aspects – specific to the structural element and application – have to be taken into account:

- Normal limits of variation in the concrete constituents
- Factors affecting large-scale concrete production, such as the usual limits of variation in water content
- Factors affecting the execution, such as the effect of temperature or pumping distances.

In this way it could be possible to achieve robust concrete properties for demanding construction projects, including under construction site conditions. More information on this topic can be found in, for example, [6, 7].

However, not all challenges can be overcome through the building materials or the construction work. With the new concept, designers should also be made aware of where they have “provoked” demanding concrete technology through their specifications (e.g. extreme levels of reinforcement). This means that the concrete producer and the contractor have to develop strategies and guidelines with the involvement of the designer in order to show the client the limits of what is feasible through concrete technology and execution of the work.

des betontechnologisch und ausführungstechnisch Machbaren gegenüber Bauherren aufzuzeigen.

4 Das EuGH-Urteil C-100/13

Der Europäische Gerichtshof (EuGH) hat entschieden, dass zusätzliche Anforderungen an CE-gekennzeichnete Bauprodukte gemäß europäischen harmonisierten Produktnormen, wie in den deutschen Bauregellisten aufgeführt, unzulässige Handelshemmnisse darstellen und somit gegen europäisches Recht verstoßen. Das Verfahren gegen die Bundesrepublik Deutschland hatte nichts mit der Betonbauweise zu tun. Beton und seine Anwendung werden von den Auswirkungen des Urteils voraussichtlich dennoch betroffen sein, da die Ausgangsstoffe zur Herstellung von Beton europäisch harmonisierten Produktnormen unterliegen (z.B. Gesteinskörnung nach DIN EN 12620). Der EuGH bezieht sich in seinem Urteil vom 16. Oktober 2014 in der Rechtssache C-100/13 konkret auf die Bauproduktenrichtlinie und auf Zusatzregelungen zu drei Produkten in den Bereichen Rohrleitungsdichtungen, Dämmstoffe aus Mineralwolle sowie Tore. Es erscheint jedoch absehbar, dass das Urteil Grundsatzcharakter für alle Bauprodukte, die der Bauprodukteverordnung (EU-BauPVO) unterliegen, hat und sich somit Auswirkungen in allen EU-Mitgliedsstaaten abzeichnen.

Von dem EuGH-Urteil sind somit letztendlich alle interessierten Kreise im Bauwesen betroffen. Die Hersteller, die der Verpflichtung nachkommen müssen, Produkte anzubieten, die den deutschen Sicherheitsstandards entsprechen, wenn sie im stand-sicherheitsrelevanten Bereich eingesetzt werden sollen. Die Architekten, Tragwerksplaner und Verwender der Bauprodukte, die sich ohne Zusatznachweise auf die Produktqualität hinsichtlich der bauordnungsrechtlich festgelegten Grundanforderungen an Bauwerke verlassen können müssen. Dies geht nur mit Produktnormen, die alle für den deutschen Markt erforderlichen Leistungsmerkmale enthalten. Die Instrumente hierfür sind in der Bauproduktenverordnung (EU-BauPVO) angelegt. Privatrechtlich spielt hier für die Planer und die Bauausführenden auch die Frage eine große Rolle, ob die harmonisierten Produktnormen den allgemeinen anerkannten Regeln der Technik in Deutschland entsprechen. Der Gesetzgeber wird schließlich durch das EuGH-Urteil gezwungen, sein gesamtes bauordnungsrechtliches System zu

4 The CJEU judgement C-100/13

The Court of Justice of the European Union (CJEU) has decided that additional requirements for building products carrying the CE mark of conformity in accordance with European harmonized product standards, such as those quoted in the German Construction Products Lists, represent inadmissible barriers to trade and are therefore contrary to European law. The procedure against the Federal Republic of Germany has nothing to do with the method of construction with concrete. In spite of this it is probable that concrete and its application will be affected by the effects of the judgement because the constituents for producing concrete are subject to European harmonized product standards (e.g. aggregate as specified in EN 12620). In its judgement of 16th October 2014 in the C-100/13 case the CJEU referred specifically to the old Construction Products Directive (CPD) and to additional German regulations for three products in the areas of pipeline seals, mineral wool insulating materials and doors. However, it is conceivable that the judgement applies in principle to all building products that are subject to the new Construction Products Regulation (CPR) and therefore affects all EU member states.

This means that all stakeholders in the building and construction industry are ultimately affected by the CJEU judgement. The producer, who must comply with the commitment to offer products that meet the German structural safety standards if they are to be used for load-bearing components. The architects, designers of load-bearing structures and the users of building products, who, without additional proof, must be able to depend on the product quality with respect to the basic requirements stipulated in the construction code law for structures. This applies only with product standards that contain all the performance characteristics required for the German market. The instruments for this are laid out in CPR. The question as to whether the harmonized product standards meet the generally acknowledged rules of technology in Germany also plays a great part here under private law for the designers and contractors. The legislators are ultimately forced by the CJEU judgement to reconsider their entire construction code law system so that national technical regulations do not contravene the harmonized product standards.

The consultations between federal and state representatives and the Commission staff with respect to the German readjustments

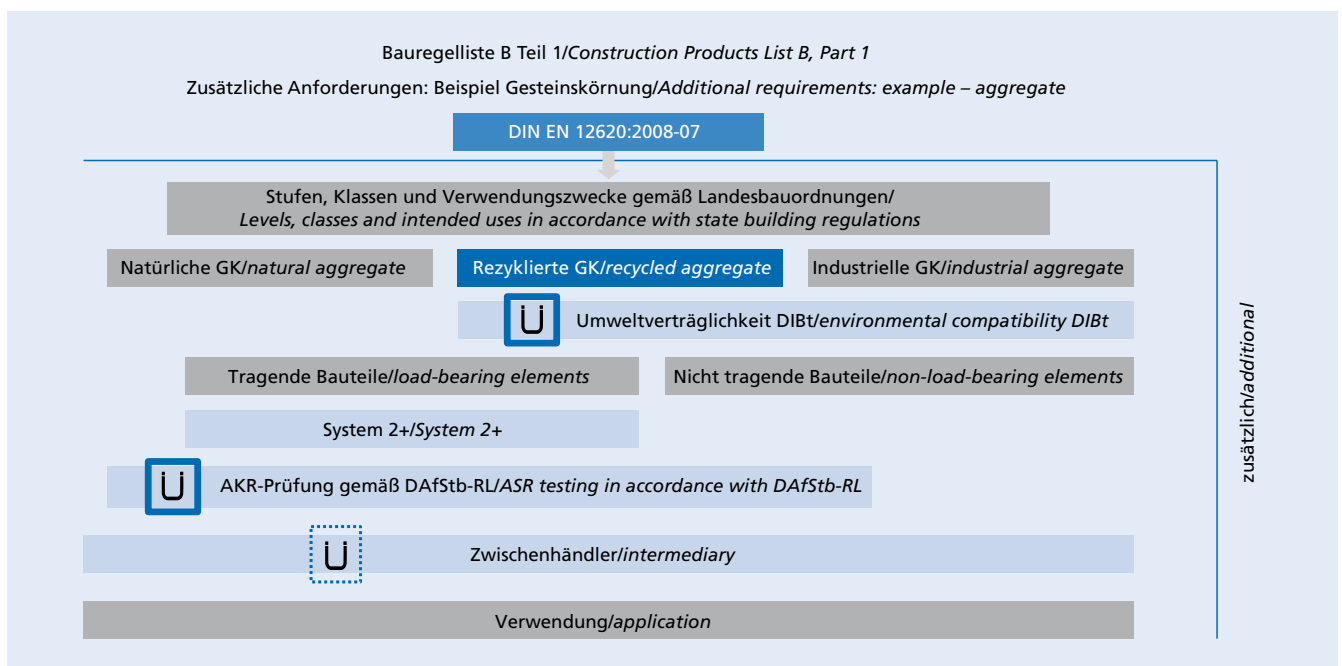


Bild 4: Zusammenhang zwischen einer europäischen harmonisierten Produktnorm und zusätzlichen nationalen Anforderungen am Beispiel der Gesteinskörnungsnorm EN 12620

Grafik: Berthold Schäfer, bbs

Figure 4: Connection between a European harmonized product standard and additional national requirements using the example of aggregates standard EN 12620

graphics: Berthold Schäfer

überdenken, sodass nationale technische Regeln nicht im Widerspruch zu den harmonisierten Produktnormen stehen.

Die Beratungen zwischen Bund- und Ländervertretern und den Kommissionsdiensten bezüglich der deutschen Nachregelungen in Bauregellisten sind noch im Gange. Der Bund hat die Einleitung von formellen Beschwerdeverfahren nach Artikel 18 der BauPVO gegen eine Reihe von Produktnormen, die nicht unseren nationalen Anforderungen genügen bzw. die formaljuristisch nicht den Vorgaben der Verordnung oder den Produktmandaten entsprechen, auf den Weg gebracht. Hiervon betroffen ist z.B. die Gesteinskörnungsnorm EN 12620. Die Beschwerde bezieht sich auf die wesentlichen Merkmale „Beständigkeit gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktivität“ sowie „Gefährliche Substanzen“. Für diese Merkmale werden derzeit nationale Nachweise erbracht und mit einem Ü-Zeichen nachgewiesen (Bild 4).

Anforderungen an Zement und Gesteinskörnungen bzgl. der Vermeidung einer schädigenden AKR sind in den entsprechenden Mandaten der Europäischen Kommission benannt. Eine gemeinsame Arbeitsgruppe der europäischen Normungsgremien für Zement, Gesteinskörnungen und Beton (CEN/TC 51, 154 und 104) war zu dem Schluss gekommen, dass AKR-Regelungen aufgrund ihrer nationalen Ausprägung und Vielfalt bislang nicht in den harmonisierten Produktnormen festgelegt werden können (siehe CEN/TR 16349 – Framework for a specification on the avoidance of a damaging ASR in concrete). Die existierenden nationalen Regelungen (in Deutschland u. a. die Alkali-Richtlinie des DAfStb) führen heute zu einer sicheren Vermeidung von AKR-Schäden. Formal werden jedoch die Mandate nicht vollumfänglich erfüllt werden. Ob die Europäische Kommission den deutschen Beschwerden stattgeben wird, ist ungewiss. Die Kommission kann gemäß Artikel 18 der BauPVO beschließen, die Fundstelle der betreffenden harmonisierten Norm im Amtsblatt der Europäischen Union (OJ-EU) zu veröffentlichen, nicht zu veröffentlichen, unter Vorbehalt zu veröffentlichen, zu belassen, unter Vorbehalt zu belassen oder zu streichen. Der Verfahrensweg eines Artikel 18-Verfahrens folgt festgelegten zeitlichen Vorgaben.

Auch von Seiten des Gesetzgebers gibt es Aktivitäten für den Umbau der bauordnungsrechtlichen Rahmendokumente, wie z.B. der Musterbauordnung, der Technischen Bestimmungen und Bauregellisten, um den Vorgaben des EuGH-Urteils gerecht zu werden.

Zentrale Aufgabe wird es künftig sein, einige europäische Normen zu verbessern. Durch die Einführung von Stufen und Klassen in harmonisierten Normen – wie es in der BauPVO vorgesehen ist – können sich alle EU-Mitgliedsstaaten mit ihren Anforderungen an die Bauwerkssicherheit wiederfinden. Bisher ist dieses System in einigen Fällen unzureichend umgesetzt. Es erfordert daher in den kommenden Jahren von deutscher Seite immer wieder Anstrengungen in den europäischen Normungsgremien, um die aus deutscher Sicht vorhandenen Defizite in den harmonisierten Produktnormen zu beseitigen. Diese Aufgabe kann nur gemeinsam mit allen am Bau Beteiligten im Konsens bewältigt werden. Wenn die Europäische Kommission in allen Mitgliedsstaaten nach zusätzlichen Anforderungen an CE-gekennzeichnete Bauprodukte „fahndet“, bleibt Deutschland gegebenenfalls nicht das einzige Land, das diesen Weg beschreitet.

5 Zusammenhang

Die Bauprodukteverordnung definiert die „Leistung (englisch „Performance“) eines Bauprodukts“ als die Leistung in Bezug auf die relevanten Wesentlichen Merkmale eines Bauprodukts, die in Stufen oder Klassen oder in einer Beschreibung ausgedrückt wird. Um die Frage, welche Wesentlichen Merkmale relevant sind, sowie ob und wie diese in europäischen (harmonisierten) Normen abgebildet werden, geht es im EuGH-Urteil C-100/13. Beim neuen Konzept zur Betonbauqualität steht u.a. die Frage im Mittelpunkt, bei welchen Bauaufgaben zusätzliche Anforderungen – insbesondere an den Frischbeton – nötig sind. Bei der Frage einer Definition von Widerstandsklassen in zukünftigen Generationen der europäischen Betonnormen soll schließlich festgestellt werden, ob und wie eine Dauerhaftigkeitsperformance von Beton bzw. Betonbau-

zu the building regulation lists are still in progress. The Federation has set in motion the introduction of formal appeal proceedings in accordance with Article 18 of the CPR against a series of product standards that do not satisfy our national requirements or, in strictly legal terms, do not correspond to the specifications of the directive or to the product mandates. This affects, for example, aggregate standard EN 12620. The appeal relates to the basic requirements “Resistance to alkali-silica reactivity” and “Dangerous substances”. National evidence is currently being produced for these features and is marked with the Ü-mark (Fig. 4).

Requirements for cement and aggregates with respect to the avoidance of a damaging ASR are designated in the corresponding mandates of the European Commission. A joint working group of the European standards committees for cement, aggregates and concrete (CEN/TC 51, 154 and 104) came to the conclusion that ASR regulations cannot, because of their national characteristics and diversity, yet be specified in the harmonized product standards (see CEN/TR 16349 – Framework for a specification on the avoidance of a damaging ASR in concrete). The existing national regulations (in Germany, the DAfStb alkali guidelines, among others) now lead to safe avoidance of ASR damage. However, the mandates are formally not fully fulfilled. It is uncertain whether the European Commission will allow the German appeal. In accordance with Article 18 of the CPR the Commission can decide to publish the citation of the relevant harmonized standard in the Official Journal of the European Union (OJ-EU), not to publish it, to publish it with reservations, to leave it with reservations or to withdraw it. The procedural route of an Article 18 procedure follows predetermined scheduled guidelines.

There are also activities on the part of the legislature for modification of the framework documents of the construction code law, such as the Model Building Code, the Technical Building Rules and the Construction products lists, in order to satisfy the provisions of the CJEU judgement.

In future the central task will be to improve some of the European standards. By the introduction of levels and classes in harmonized standards – such as is provided in the CPR – all the EU member states can identify with their requirements for safety of structures. In some cases in the past this system has been inadequately implemented. Consistent efforts are therefore required in the coming years on the part of Germany in the European standards committees to eliminate the deficiencies that, in the German view, exist in the harmonized product standards. This task can only be dealt with jointly in consensus with all those involved in construction. If the European Commission “hunts” for additional demands on construction products with the CE marking in all the member states Germany may not be the only country to have taken this route.

5 Connection

The Construction Products Regulation (CPR) defines the “essential characteristics” as those characteristics of the construction product which relate to the basic requirements for construction works. The “performance of a construction product” means the performance related to the relevant essential characteristics, expressed by level or class, or in a description. CJEU judgement C-100/13 concerns the question as to which essential characteristics are relevant and whether or how these are described in European (harmonized) standards. In the new concept for concrete construction quality there is, among other things, the central question about the construction projects for which additional (performance) requirements – in particular for the fresh concrete – are necessary. For the question of a definition of resistance classes in future generations of the European concrete standard it should ultimately be established whether and how the durability performance of concrete or concrete structural elements can be described on a basis that is comparable throughout Europe.

The recurrent theme: What is the “performance” of a concrete and how can it be verified” therefore runs through all three areas.

Those essential components that are relevant in performance concepts can be clearly shown using the example of verification

teilen auf einer europaweit vergleichbaren Basis beschrieben werden kann.

Durch alle drei Bereiche zieht sich somit eine Frage wie ein „roter Faden“: Was ist die „Performance eines Betons und wie weist man sie nach“?

Am Beispiel von Dauerhaftigkeitsnachweisen lässt sich anschaulich zeigen, welche bauordnungsrechtlichen Komponenten in Performance-Ansätzen relevant sind. Als konkrete Beispiele für Performanceprüfungen in praktischer Anwendung können angeführt werden:

- Zulassungsverfahren beschrieben in DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Anhang B, zum Nachweis der
 - Anwendung von Zementen, deren Anwendung in verschiedenen Expositionsklassen aufgrund nicht ausreichender Erfahrung bisher ausgeschlossen wurde,
 - Anwendung neuer Betonausgangsstoffe,
 - Anwendung von Betonen, die von DIN 1045-2 abweichen.
- Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 einschließlich Anlage zum ARS Nr. 04/2013 vom 22.01.2013 „WS-Grund- und Bestätigungsprüfung zur Beurteilung der Eignung von groben Gesteinskörnungen für die Feuchtigkeitsklasse WS“

Bei den genannten Beispielen handelt es sich um zwei „Grundtypen“ von Nachweislinien, in denen die in Tafel 1 dargestellten bauordnungsrechtlichen Komponenten definiert und beschrieben werden.

Im Folgenden werden die wesentlichen Eckpunkte, Fragestellungen und Anforderungen für die in Bild 5 graphisch dargestellten bauordnungsrechtlichen Komponenten dargestellt und diskutiert.

5.1 Nachweisverfahren

Unabhängig davon, ob eine Frisch- oder eine Festbetoneigenschaft beschrieben bzw. überprüft werden soll, muss zunächst ein geeignetes Messverfahren definiert werden. Grundlegende Anforderungen an Messverfahren sind z.B. in DIN 1319-1 zusammengestellt. Festzulegen sind neben dem Messprinzip (z.B. physikalische Grundlage der Messung), der Messgröße (z.B. physikalische Größe, der die Messung gilt) und dem Messobjekt (z.B. Art des Probekörpers) auch die Messung (Ausführung der geplanten

of durability. The following can be cited as specific examples of performance testing in practical applications:

- Approval procedure described in DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Appendix B, as proof of
 - use of cements, the use of which in various exposure classes was previously excluded due to inadequate experience,
 - use of new concrete constituents,
 - use of concrete that deviate from DIN 1045-2.
- General Road Construction Newsletter (ARS) No. 04/2013 including the attachment to ARS No. 04/2013 dated 22.01.2013 “WS basic and confirmatory testing to assess the suitability of coarse aggregates for the WS moisture class”

The examples given are two “basic types” of lines of verification in which the essential components shown in Table 1 are defined and described.

The essential key points, issues and requirements for the construction code law components shown diagrammatically in Fig. 5 are described and discussed below.

5.1 Verification procedure

Regardless of whether a fresh or a hardened concrete property is to be described or checked it is first necessary to define a suitable method of measurement. The basic requirements for methods of measurement are, for example, compiled in DIN 1319-1. It is necessary to stipulate not only the measuring principle (e.g. the physical principles of the measurement), the measured variable (e.g. the physical variable to which the measurement applies), and the measured object (e.g. the type of test piece) but also the measurement itself (implementation of the planned activity). The latter while bearing in mind the essential influencing variables, such as ambient temperature or humidity. It must also be possible to state the precision or reproducibility (standard deviation of repeatability, standard deviation of reproducibility).

5.2 Assessment and evaluation procedures

The measurement becomes a test if it is established whether a condition (assessment criterion, limit) is satisfied. Both when stipulating the measuring principle and when defining the assessment criteria the applicability to practical conditions does, as a rule, form part of the requirement profile. For example, an appropriate

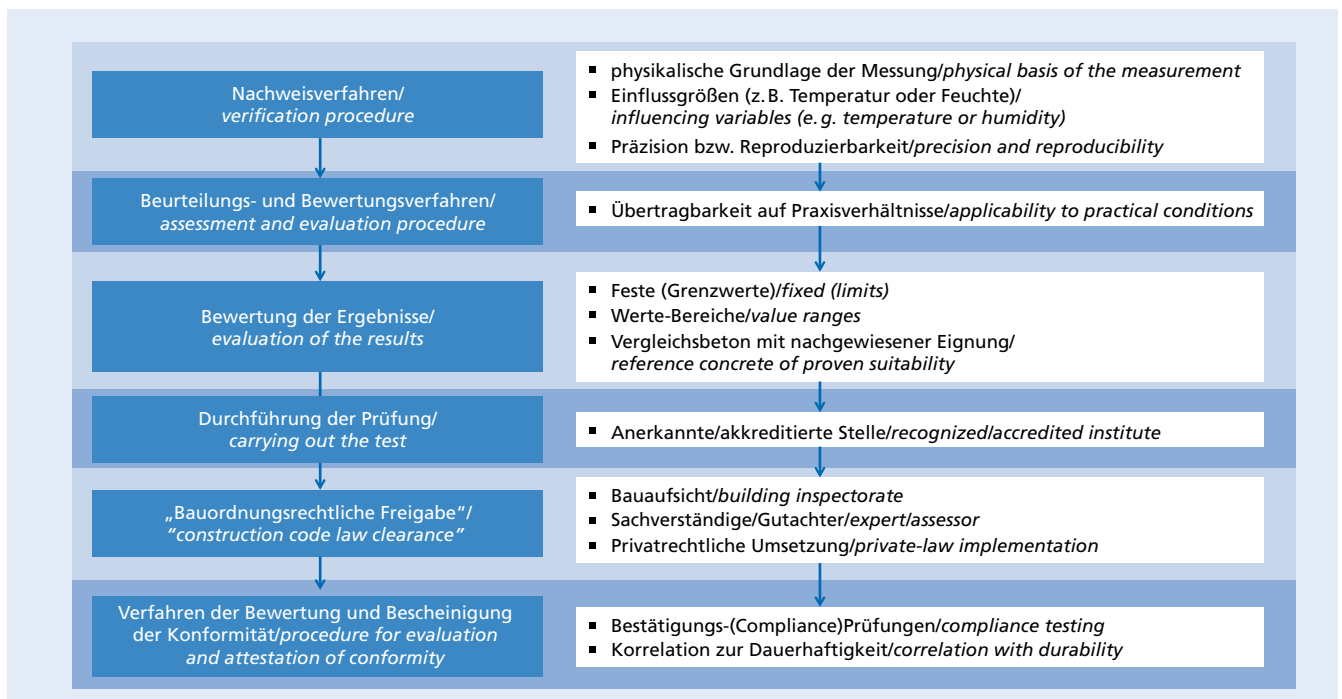


Bild 5: Bauordnungsrechtliche Komponenten zur Umsetzung von Performance-Konzepten

Figure 5: Construction code law components for implementation of performance concepts

Tafel 1: „Grundtypen“ von Nachweislinien
 Table 1: “Basic types” of lines of verification

	Typ 1/Type 1	Typ 2/Type 2
Bauordnungsrechtliche Komponente <i>Construction code law components</i>	DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Anhang B <i>CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Appendix B</i>	ARS Nr. 04/2013 + Anlage <i>ARS No. 04/2013 + enclosure</i>
Nachweisverfahren <i>Verification procedure</i>	– Carbonatisierung nach RILEM CPC 18/ <i>carbonation acc. to RILEM CPC 18</i> – Chlorideindringwiderstand nach NT Build 492/ <i>chloride penetration resistance acc. to NT Build 492</i> – Frostwiderstand nach CEN/TS 12390-9 (Würfel-Verfahren) oder CF/CIF-Test nach CEN/TS 12390-9 und CEN/TR 15177/ <i>freeze-thaw resistance acc. to CEN/TS 12390-9 (cube method) or CF/CIF test acc. to CEN/TS 12390-9 and CEN/TR 15177</i> – Frost-Tausalz-Widerstand CDF-Test nach CEN/TS 12390-9/ <i>resistance to freeze-thaw with de-icing salt, CDF test acc. to CEN/TS 12390-9</i>	– WS-Betonversuch mittels FIB-Klima-wechselagerung (Gutachterverfahren)/ <i>WS concrete test using FIB climate storage (experts procedure)</i> – WS-Betonversuch mittels 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (modifiziertes Verfahren nach Alkali-Richtlinie – Anhang C bzw. Entwurf TP Beton)/ <i>WS concrete test using 60 °C concrete test with alkali supply (modified procedure acc. to alkali guidelines – Appendix C and draft TP concrete)</i>
Beurteilungs- und Bewertungsverfahren <i>Assessment and evaluation procedure</i>	– Carbonatisierung: Bewertungshintergrund gemäß Abbildungen B.1-B.4 in DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Anhang B <i>carbonation: evaluation background in accordance with diagrams B.1-B.4 in CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Appendix B</i> – Chlorideindringwiderstand: Grenzwert <i>chloride penetration resistance: limit value</i> – Frostwiderstand: Grenzwert <i>freeze-thaw resistance: limit value</i> – Frost-Tausalz-Widerstand: Grenzwert und ggf. Vergleichsbeton/resistance to freeze-thaw with de-icing salt: limit and possibly reference concrete	– Bewertungshintergrund der Gutachter/ <i>evaluation background of the expert</i> – (Beispiel 60 °C-Betonversuch siehe [8])/ (example 60 °C concrete test see [8])
Verfahren der Bewertung und Bescheinigung der Konformität <i>Procedure for evaluation and attestation of conformity</i>	gemäß Festlegungen der abZ bzw. der ETA für/ <i>in accordance with guidelines from abZ or the ETA for</i> – WPK/FPC – Fremdüberwachung/third-party monitoring – Anwendungsregeln/application rules	– Performanceprüfung (Gutachten)/ <i>performance testing (expert opinion)</i> – Aufnahme in bast-Liste/ <i>introduction to bast list</i> – Bestätigungsprüfung/ <i>compliance testing</i>
Durchführung der Performance-Prüfung <i>Carrying out the performance test</i>	vom DIBt zugelassene Stellen/ <i>establishments approved by the DIBt</i>	Gutachter gemäß bast-Liste/ <i>expert in acc. with bast list</i>
Bewertung der Ergebnisse <i>Evaluation of the results</i>	Sachverständigenausschuss/ <i>committee of experts</i>	Gutachter/expert
„Bauordnungsrechtliche Freigabe“ <i>“Construction code law clearance”</i>	DIBt/ <i>DIBt</i>	bast-Liste: „AKR-Performance-Prüfung (Verfahren V1)“/ <i>bast list: “ASR performance testing (procedure V1)”</i>

Tätigkeiten) selbst. Letztere unter Berücksichtigung wesentlicher Einflussgrößen wie z.B. Umgebungstemperatur oder Feuchte. Daneben müssen Aussagen zur Präzision bzw. Reproduzierbarkeit (Wiederholstandardabweichung, Vergleichsstandardabweichung) möglich sein.

5.2 Beurteilungs- und Bewertungsverfahren

Aus der Messung wird eine Prüfung, wenn festgestellt wird, ob eine Bedingung (Beurteilungskriterium, Grenzwert) eingehalten wird. Sowohl bei der Festlegung des Messprinzips als auch der Definition der Beurteilungskriterien gehört die Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse in der Regel zum Anforderungsprofil. So wurde zum Beispiel für AKR-Performance-Prüfungen mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr von außen über Bohrkernentnahmen aus geschädigten und ungeschädigten Betonfahrbahndecken ein entsprechender Bewertungshintergrund geschaffen, aus dem Bewertungskriterien abgeleitet wurden [8]. Für Carbonatisierungsprüfungen kann auf den in den Abbildungen B.1-B.4 in DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Anhang B dargestellten Bewertungshintergrund zurückgegriffen werden. Eine dritte

evaluation background, from which the evaluation criteria were derived, was created for ASR performance testing with the 60 °C concrete test with external addition of alkalis by removal of drill cores from damaged and undamaged concrete carriageways [8]. For carbonation testing it is possible to make use of the evaluation background shown in diagrams B.1-B.4 in CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Appendix B. A third option is comparison of the results from the test concrete with those from a reference concrete of proven suitability.

5.3 Procedures for evaluation and attestation of conformity

Once the concrete or its constituents have been tested (in ARS No. 04/2013 this is the so-called basic testing), procedures and criteria must be stipulated with which the validity of the testing and its evaluation over a defined period can be confirmed without having to repeat the complete test in every case (fresh concrete tests are an exception). For this purpose it is necessary to define compliance tests that are related to the information/result from the basic testing. If there is a connection between another concrete property

Liste der anerkannten AKR-Prüfstellen und AKR-Gutachter List of recognized ASR test institutes and ASR experts

Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Fahrbahndecken aus Beton/Alkali-silica reaction in concrete carriageway surfaces

Zur Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) sind die Regelungen des durch das Bundesverkehrsministerium veröffentlichten Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau (ARS) Nr. 04/2013 zu beachten.

The regulations of the General Road Construction Newsletter (ARS) No. 04/2013 published by the Federal Ministry of Transport must be observed in order to avoid damage to concrete carriageway surfaces as a result of the alkali-silica reaction (ASR).

Im Folgenden werden die vom BMVI beziehungsweise der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) aktuell anerkannten Einrichtungen für die Erstellung von AKR-Gutachten sowie die fachkundigen Personen aufgelistet:

The establishments that are currently recognized by the BMVI or the BASt (Federal Highway Research Institute) for preparing expert evaluations and the expert personnel are listed below:

Technische Universität München Centrum Baustoffe und Materialprüfung Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz Baumbachstraße 7 81245 München	Bauhaus Universität Weimar F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig Coudraystraße 11 99421 Weimar	Chemisch Technisches Laboratorium Heinrich Hart GmbH Dr. rer. nat. Alexander Richter Kurt-Schumacher-Straße 9 51427 Bergisch Gladbach
Forschungsinstitut der Zementindustrie/ VDZ gGmbH Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller Tannenstraße 2 40476 Düsseldorf	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMIPA)) Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht Pffaffenwaldring 4 70569 Stuttgart	

Bild 6: Qualifikation zur Durchführung von Performance-Prüfungen – links: Gutachter nach ARS Nr. 04/2013 + Anlage – rechts: Beispiel einer Akkreditierungsurkunde
Figure 6: Qualification for carrying out performance tests – left: experts as described in ARS No. 04/2013 + enclosure – right: example of an accreditation certificate



Möglichkeit ist der Vergleich der Ergebnisse des Prüfbetons mit einem Referenzbeton mit nachgewiesener Eignung.

5.3 Verfahren der Bewertung und Bescheinigung der Konformität

Wurden der Beton bzw. seine Ausgangsstoffe einmal bewertet (im ARS Nr. 04/2013 ist dies die sog. Grundprüfung), müssen Verfahren und Kriterien festgelegt werden, mit denen die Gültigkeit der Prüfung und ihrer Bewertung über einen definierten Zeitraum bestätigt werden können, ohne in jedem Fall die vollständige Prüfung wiederholen zu müssen (eine Ausnahme sind Frischbetonprüfungen). Hierzu müssen Bestätigungs-(Compliance)Prüfungen definiert werden, die in einem Zusammenhang mit der Aussage der Grundprüfung stehen. Besteht ein Zusammenhang zwischen einer anderen Betoneigenschaft und seiner Festigkeit, so kann die Festigkeit als Überwachungsprüfung herangezogen werden. Bei Dauerhaftigkeitsprüfungen ist dies in der Regel nicht der Fall. Im Fall von AKR-Performance-Prüfungen nach ARS Nr. 04/2013 erfolgt eine Bestätigungsprüfung an der Gesteinskörnung (Schnelltest plus RFA/XRD) sowie Anforderungen an den Zement (Na_2O -Äquivalent) und die Betonzusammensetzung – ggf. unter Angabe zulässiger Schwankungsbereiche. Im Falle anderer Dauerhaftigkeitsparameter wie z.B. beim Chlorideindringen oder der Frostprüfung im CIF-Test sind Parameter geeignet, die am Zementstein bzw. Normmörtel bestimmbar sind, und eine Aussage zum Hydratationsgrad und zur Gefügeausbildung ermöglichen. Erste Ansätze hierzu finden sich in [5].

5.4 Durchführung der Performance-Prüfung

Die Durchführung einer Performance-Prüfung und die qualifizierte Bewertung der Ergebnisse setzt gewisse Erfahrung voraus. Mit der Durchführung von Prüfungen nach DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Anhang B können die durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zugelassenen Stellen betraut werden. Nachweise gemäß ARS Nr. 04/2013 + Anlage erfolgen durch die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (baSt) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (bmvi) zugelassenen Gutachter. Übergeordnet bietet es sich an, auf eine

and its strength then the strength can be employed as a monitoring test. As a rule, this is not the case with durability tests. In the case of ASR performance tests as specified in ARS No. 04/2013 a compliance test is carried out on the aggregate (rapid test plus XRF analysis and/or XRD) as well as requirements for the cement (Na_2O -equivalent) and the concrete composition – if necessary with a statement of permissible variation limits. In the case of other durability parameters, such as with chloride penetration or freeze-thaw testing in the CIF test, any parameters are suitable that can be determined on hardened cement paste or standard mortar and provide information about the degree of hydration and formation of the microstructure. Initial approaches in the direction can be found in [5].

5.4 Carrying out the performance test

Carrying out a performance test and qualified evaluation of the results requires a certain degree of experience. The institutes notified by the Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) can be entrusted with carrying out the tests as specified by CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Appendix B. Verification in accordance with ARS No. 04/2013 + enclosure is provided by the experts authorized by the Federal Highway Research Institute on behalf of the Federal Ministry for Traffic and Digital Infrastructure. At a higher level it is appropriate to consider accreditation of laboratories for the corresponding tests specified in DIN EN ISO/IEC 17025:2005 (Fig. 6).

5.5 Evaluation of the results

As described previously, there are three different ways of evaluating the results of performance tests:

- fixed values (limits)
- value ranges
- comparison/reference concrete of proven suitability

In the most favourable case the criteria are so clear that they lead to an unequivocal “yes/no” decision. So far this has not been the case either with the tests specified by CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097), Appendix B (A), or as specified in ARS No. 04/2013 + enclosure (B). In case (A) the decision is the responsi-

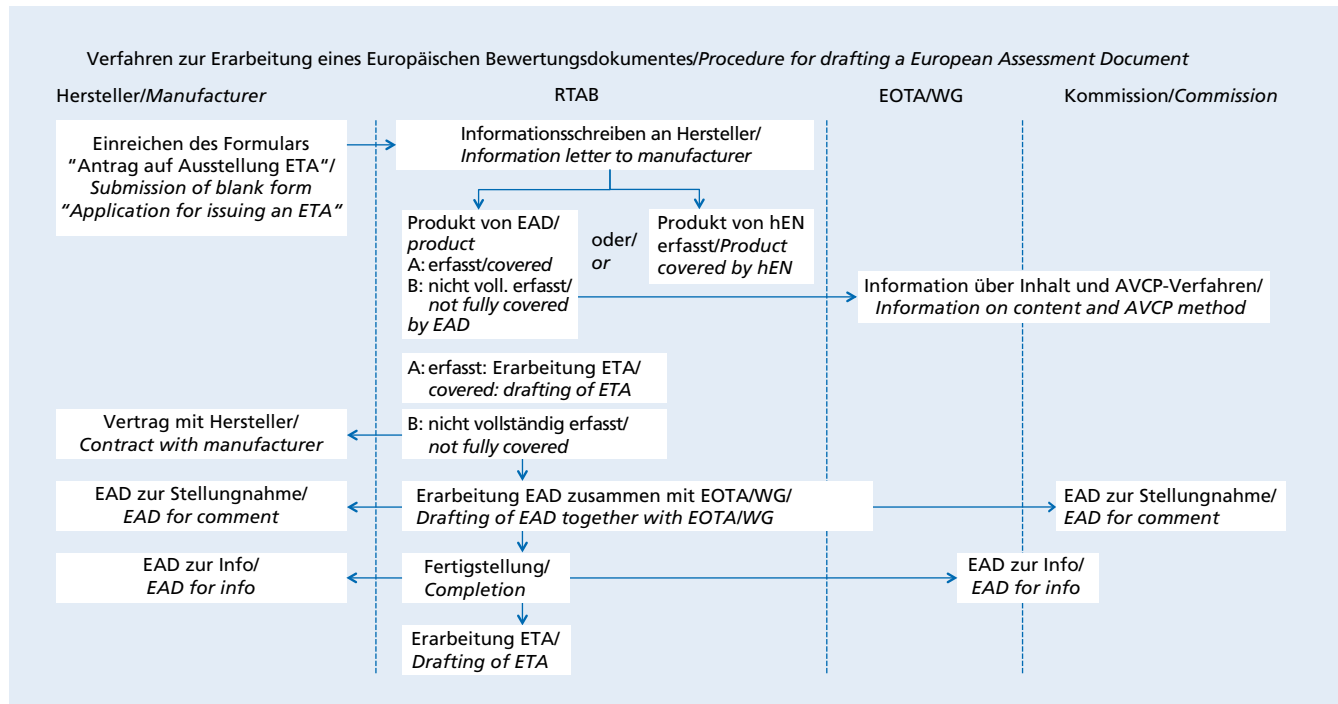


Bild 7: Der Weg zur europäischen technischen Bewertung (European Technical Assessment)
Figure 7: The route to European Technical Assessment

(Quelle: DIBt)
 (source: DIBt)

Akkreditierung der Labore für die entsprechenden Prüfungen nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 zu achten (Bild 6).

5.5 Bewertung der Ergebnisse

Wie zuvor beschrieben, kommen zur Bewertung der Ergebnisse von Performance-Prüfungen drei Varianten in Frage:

- Feste Werte (Grenzwerte)
- Werte-Bereiche
- Vergleichs-/Referenzbeton mit nachgewiesener Eignung

Im günstigsten Fall sind die Kriterien so eindeutig, dass sie zweifelsfrei zu einer „Ja/Nein“-Entscheidung führen. Weder bei den Prüfungen nach DIN CEN/TR 16563 (DIN SPEC 18097) Anhang B (A) noch nach ARS Nr. 04/2013 + Anlage (B) ist dies bisher der Fall. Im Fall (A) obliegt die Entscheidung dem DIBt nach Beratung im zuständigen Sachverständigenausschuss. Im Fall (B) enthält das Regelwerk keine festen Bewertungskriterien. Die Beurteilung obliegt dem jeweiligen Gutachter. Wollte man also Performance-Konzepte in eine breitere Anwendung bringen, so müsste man hierzu entweder zu eindeutigen „Ja/nein“-Entscheidungskriterien kommen oder Entscheidungsgremien etablieren. Im Fall der „Ja/Nein“-Entscheidungen müssten die Kriterien mit entsprechenden „Vorhaltemaßen“ versehen werden, um zum Beispiel übliche Schwankungsbreiten in der großtechnischen Produktion von Beton und seinen Ausgangsstoffen zu berücksichtigen. Alternativ könnte eine Art „Sachverständigen-Ausschuss“ auch in anderen Zusammenhängen eingerichtet werden – z.B. im Rahmen des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton.

5.6 Bauordnungsrechtliche Verankerung

Unter den gültigen bauordnungsrechtlichen Randbedingungen steht neben den bereits zuvor genannten Wegen bei harmonisierten Produktnormen auch die Europäische Technische Bewertung (ETB) als (ein) bauordnungsrechtliches Instrument zur Verfügung. Ist ein Leistungsmerkmal in einer europäischen (harmonisierten) Norm nicht enthalten, kann die Erstellung eines Europäischen Bewertungsdokumentes EAD (soweit nicht bereits vorhanden) durch den Hersteller eines Bauprodukts beantragt werden (Bild 7). Auf der Basis des EAD und bei entsprechenden Ergebnissen der Un-

bility of the DIBt after consultation with the relevant committee of experts. In case (B) the regulations do not contain any fixed evaluation criteria. The assessment is the responsibility of the particular expert. This means that if performance concepts are to be given wider application then it would be necessary either to reach clear “yes/no” decision criteria, to establish decision committees or to implement an accreditation system for experts. In the case of “yes/no” decisions the criteria would have to be provided with appropriate “allowances” in order, for example, to take account of the usual limits of variation in the large-scale production of concrete and its constituents. As an alternative some kind of “committee of experts” could be established, also with other connections – such as within the framework of the German Committee for Structural Concrete (DAfStb).

5.6 Embodiment in construction code law

Among the current construction code law framework conditions not only the previously mentioned routes for harmonized product standards but also the European Technical Evaluation are available as instruments of the construction code law. If a performance feature is not included in a European (harmonized) standard then the preparation of a European assessment document (EAD) can be requested (provided it does not already exist) by the producer of a building product (Fig. 7). On the basis of the EAD and with appropriate results from the investigations the building products can be given the CE mark of conformity.

In their application rules the member states can then make reference to the – in our case – durability-related performance features (e.g. freeze-thaw resistance of a new constituent in the concrete). In the current discussion over possible consequences of the CJEU judgement this route is the route that the construction code law approvals can take instead of the national technical approvals previously used.

Private-law verification concepts are currently being discussed as an alternative.

tersuchungen können Bauprodukte CE-gekennzeichnet werden. Die Mitgliedsstaaten können in ihren Anwendungsregeln dann auf die – in unserem Fall – dauerhaftigkeitsbezogenen Leistungsmerkmale (z.B. Frostwiderstand eines neuen Ausgangsstoffs im Beton) Bezug nehmen. Dieser Weg ist in der aktuellen Diskussion um mögliche Folgen des EuGH-Urteils der Weg, der bauordnungsrechtlich anstelle der bisher verwendeten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen treten kann.

Alternativ werden derzeit privatrechtliche Nachweiskonzepte diskutiert.

Literatur / Literature

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Mitteilung des DAfStb zur E DIN 1045-2:2014-08 (Dezember 2014)
- [2] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Tätigkeitsbericht 2012–2015
- [3] Verband Deutscher Betoningenieure (VDB): VDB Information 128/15 (Oktober 2015)
- [4] von Greve-Dierfeld, S.: Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile. Dissertation TU München 2015
- [5] Müller, C.; Palm, S.; Wolter, A.; Bohne, T.: Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton. beton 64 (2014) H. 7+8, S. 305–309
- [6] Westendarp, A.: Anforderungen an die Betontechnik aus Sicht eines öffentlichen Bauherren. beton 65 (2015) H. 12, S. 584–589
- [7] Reiners, J., Müller, C., Penttillä, J., Breitenbücher, R.: Erreichen projektierter Betoneigenschaften im modernen 5-Stoff-System diverser Betonausgangsstoffe. beton 65 (2015) H. 12, S. 617–621
- [8] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance- und WS- Grundprüfungen. beton 62 (2012) H. 10, S. 397–404

Betontechnische Berichte – Sachverzeichnis 1960 bis 2015

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.
Abnutzwiderstand	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. 69 ff. 81 ff. 2015 / 39 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.	Beschleuniger	siehe Zusatzmittel	Betoneigenschaften (Forts.)	
Baryt	1961 / 101 ff.	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. 2015 / 21 ff. 31 ff.	– bei tiefen Temperaturen	1970 / 60 ff. 1981 / 17 ff.
Barytbeton	1961 / 110 ff. 125			Betonfestigkeitsklassen	siehe Betongüte
Baugrund	1962 / 141 ff.			Betonförderung	1962 / 177 ff. 1965 / 144 ff.
Baunormen				Betonformsteine	siehe Formsteine
– DIN 1045	1968 / 83 ff. 127 ff. 1969 / 106 ff. 1972 / 173 ff. 2003 / 19 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.			Betongefüge	2000 / 25 ff. 2003 / 121
– DIN EN 197	2003 / 10			– Prüfung	1994 / 39 f.
– DIN 1164	1968 / 21 ff. 1969 / 53 1971 / 55 ff. 1997 / 7 ff. 2003 / 133 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.			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 4030	1968 / 96 ff. 127 ff. 1985 / 49	(siehe auch Abnutz widerstand, Alkalireaktion, chemische Widerstandsfähigkeit, Dauerfestigkeit, Erosionswiderstand, Feuerbeständigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand, Frostwiderstand, Kavitationswiderstand, Korrosionsschutz)		Betonierabschnitte	1961 / 115 ff. 1964 / 33 ff.
– DIN 4102	1978 / 71 ff.	Beständigkeitsfaktor	1962 / 95 ff.	Betonpfähle	1962 / 143 f. 1966 / 41 ff. 1968 / 49 ff.
– DIN 4108	1976 / 42 ff.	Beton B I	1972 / 185 ff.		
– DIN 4226	1968 / 91	Beton B II	1972 / 187 f.	betonschädliche Wässer	siehe chemische Widerstandsfähigkeit
– DIN 18551	1973 / 139 ff.	Betonanwendung		Betonschutz	1967 / 85 ff. 1968 / 139 1970 / 51 f. 1973 / 125 ff.
– EN 206	2012 / 69 ff.	– Expositionsklassen	2003 / 21 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.		(siehe auch Anstriche, Beschichten, Imprägnieren)
– internationale	1979 / 43 ff. (siehe auch Richtlinien und Merkblätter)	– Gesundheit	2000 / 123 ff. 135	Betonsplittbeton	1983 / 21 ff.
Bauordnungsrecht	2015 / 95 ff.	– Umwelt	2000 / 111 135	Betonsteine	1962 / 69 ff. 1967 / 143 ff.
Behälter	1970 / 58 f. 1971 / 21 f. 1976 / 31 f. 1981 / 18 f. 1991 / 107	Betonbauqualität	2015 / 95 ff.	Betonstraßen	1961 / 221 ff. 1962 / 81 1965 / 21 ff. 31 ff. 2000 / 111 2009 / 39 ff. (siehe auch Straßenbeton)
Belastungsgeschwindigkeit	1961 / 57 f. 1963 / 74 1964 / 83 1971 / 47 2009 / 57 ff.	Betondeckung	siehe Korrosionsschutz	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.
Bergbau	siehe Grubenausbau und Schachtausbau	– Prüfverfahren	1988 / 101 ff.		
Bergsenkung	1962 / 142 f.	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.		
Beschichten	1962 / 76 1963 / 118 ff. 1967 / 88 ff. 1969 / 41 ff. 130 ff. 1973 / 125 ff. 1979 / 108 ff.	– bei Erschütterungen	1981 / 66 ff.		
		– bei hohen Temperaturen	1961 / 132 ff.		

Betontemperatur (Forts.)	1967 / 41 ff.	Betonzusammensetzung (Forts.)		Bruchverhalten (Forts.)	164 ff.
	68 f.		57 ff.		1972 / 152 ff.
	1968 / 146 ff.		71 ff.		1974 / 47 ff.
	1969 / 74 ff.	2015 /	21 ff.		1976 / 153 f.
	1970 / 57 ff.		49 ff.		1977 / 39 ff.
	1973 / 85 f.		67 ff.		1978 / 31 ff.
	1974 / 151 ff.				1979 / 38 f.
	1975 / 17 ff.	– Zementleimgehalt	1997 / 64 f.		1981 / 24
	1976 / 168				1991 / 57 ff.
	1981 / 17 ff.	– nachträgliche	1968 / 35 ff.	Brückenwiderlager	1964 / 53
	141 ff.	Bestimmung	1972 / 21 ff.		1968 / 145 ff.
	159 f.		1981 / 37 ff.		
	1983 / 135 f.	Betriebsfestigkeit	1981 / 133 ff.	C ₃ A-Gehalt	1960 / 104
	187 ff.	Bettungsбетон	1960 / 112 ff.		1966 / 34 ff.
	1985 / 125	Bewuchsbeseitigung	1972 / 117 ff.		1971 / 84 ff.
	145 f.	Biegezugfestigkeit	1960 / 44 ff.		1981 / 152 ff.
	1994 / 135		1961 / 42 f.	Calciumsilicat	1983 / 63
	187 ff.		205	Carbonatisierung	1960 / 83 ff.
2009 / 57 ff.	71 ff.		252 ff.		115
(siehe auch Feuerbeständigkeit und Wärmedehnung)			1962 / 124 f.		1962 / 48 ff.
– Messverfahren	1968 / 154 ff.		1963 / 59 ff.		1963 / 107
	1970 / 185 ff.		1964 / 165 f.		1969 / 58
	1994 / 128 f.		1970 / 101 ff.		1972 / 47
Betonwaren	1964 / 107		1985 / 106 ff.		125 ff.
	111	– bei Erschütterungen	1981 / 76 ff.		1976 / 167
	1965 / 206 ff.	– bei hohen	1962 / 106 f.		1988 / 21 ff.
– Rohre	1994 / 53 ff.	Temperaturen	1969 / 31		87 ff.
	1997 / 99				186 f.
Betonzusammensetzung		– Prüfverfahren	1963 / 72 ff.		1991 / 144 f.
	1960 / 107 ff.	Bindemittel	1960 / 102		181
	1961 / 137 ff.		1962 / 105		209 f.
	1962 / 24 ff.	Binghamsche Flüssigkeit			1994 / 173 ff.
	128 ff.		1972 / 53		1997 / 145
	167 ff.		1973 / 24 f.		2000 / 21
	1963 / 64 ff.		1976 / 126 ff.		2006 / 29 ff.
	89 ff.				2009 / 7 ff.
	143 ff.				71 ff.
	165 ff.			– Prüfverfahren	1988 / 28 f.
	1964 / 27 ff.				1997 / 148 f.
	73 ff.				2009 / 7 ff.
	1965 / 137 ff.	Bioklimatik	1975 / 143 ff.		71 ff.
	199 f.		1978 / 157 ff.		
	1966 / 63 ff.	Blähton	1964 / 143 ff.	CEB-Regelwerk	1979 / 50 ff.
	120 ff.		1965 / 40 ff.		
	157 ff.			chemische	1962 / 25 f.
	1967 / 26 f.	Bodenverfestigung	1961 / 141 ff.	Widerstandsfähigkeit	147 ff.
	74 ff.		223 ff.		1963 / 96 ff.
	1968 / 88 ff.		1962 / 63 ff.		1966 / 33 ff.
	1970 / 121 ff.		1963 / 175 ff.		1967 / 19 ff.
	1973 / 144 ff.		1973 / 41 ff.		85 ff.
	1976 / 136 ff.		1978 / 17 ff.		1968 / 41 ff.
	1983 / 122 ff.				127 ff.
	1985 / 123 f.	Böschungsschutz	siehe Uferbefestigung		1970 / 33 ff.
	1988 / 87 ff.				1971 / 83 ff.
	1994 / 158	Bohrkerne	1961 / 219 f.		1975 / 57 ff.
	190 f.		1970 / 95 ff.		91 ff.
	218 ff.				1976 / 166 f.
	1997 / 64	Brandgase	1970 / 33 ff.		1978 / 93 ff.
	69	Brandschutz	1978 / 71 ff.		1979 / 71 ff.
	2000 / 43	Brandversuche	1962 / 80		1985 / 41 ff.
	93	Bruchsteinbeton	1960 / 114		1994 / 76 f.
	114 f.	Bruchverhalten	1970 / 83 ff.	– angreifende Wässer	1960 / 120 f.
	2003 / 21 f.		1971 / 33 ff.	und Böden	1961 / 267 f.
	93				1962 / 147 ff.
	157				1967 / 24 ff.
	185				1968 / 127 ff.
2009 / 7 ff.					1975 / 57 ff.

chemische
Widerstandsfähigkeit (Forts.)

– angreifende Wässer und Böden	91 ff. 1976 / 167 1979 / 72 ff. 1988 / 117 ff. 1994 / 75 139 ff.
– Ammonium	1994 / 71 ff.
– Angriffsgrad	1967 / 23 ff. 1968 / 131 ff. 1972 / 191 f. 1988 / 117 f. 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

 chemische
Widerstandsfähigkeit (Forts.)

– Öleinwirkung (Forts.)	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. 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.

Chlorid-Diffusion (Forts.)

	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 (siehe auch Wärmebehandlung)	1961 / 274
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.
Dauerhaftigkeitsklassen	2015 / 95 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.

dichter Beton (Forts.)		Druckfestigkeit (Forts.)	171 f. 187 ff. 225 f.	Einbringen des Betons (Forts.)	1974 / 139 ff.
– Prüfverfahren	1991 / 115 1994 / 57 f. 160		1997 / 72 ff. 2000 / 18 f. 2009 / 7 ff. 19 ff. 57 ff. 71 ff. 93 ff. 2015 / 31 ff.	Eindringen/Flüssigkeiten	1994 / 162 ff. 213 ff.
Diffusion	1988 / 43 ff. 127 ff. 1991 / 110 130 f. 164 f. 1994 / 56 ff. 155	– bei Erschütterungen	1981 / 69 ff.	Einheiten-Systeme	1978 / 105 ff.
Dispergierung		– bei hohen Temperaturen	1962 / 106 f. 1969 / 24 ff. 36 1971 / 27 1976 / 34 f.	Einpressmörtel	1961 / 177 ff. 1977 / 165 ff.
– Silicastaub	2003 / 127 ff.			– Prüfverfahren	1961 / 187 1965 / 210 1977 / 172 ff. 1981 / 150 f.
Dolomit	1962 / 155 f.	– bei tiefen Temperaturen	1970 / 61 ff. 1981 / 21 f.	Einpressungen	siehe Auspressen
Dreistoffbindemittel	1960 / 102	– mehrachsige	1976 / 35 ff. 154	Eis (Eigenschaften)	1970 / 60 f.
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	– Mikrohärte	1983 / 41 ff.	Eisenerze	1961 / 101 f.
		– Schnellprüfung	1961 / 273 ff.	Eisenportlandzement	1971 / 60 f. 1983 / 88
		Druckkraftaufnahme	siehe Kraftableitung	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.
		dynamische Beanspruchungen	1981 / 62 ff. 130 ff.	– Bestimmungsverfahren	1970 / 146 ff. 1971 / 119 ff.
		Durchlässigkeit		– Modellvorstellungen	1970 / 152 ff.
		– Prüfverfahren	1988 / 149 ff. 1994 / 219 f.	elasto-plastischer Stoff	1978 / 34 ff.
		Eigenfeuchte		elektrostatische und -magnetische Felder	1975 / 144 ff. 1978 / 157 ff.
		– Beton	1968 / 113 ff. 1970 / 99 ff. 1981 / 27 2009 / 93 ff.	Energieaufnahme	1974 / 48 ff.
		– Gesteinskörnung	1966 / 89 ff. 1974 / 91 ff. 137 1976 / 146		
		Eigenspannungen	1960 / 73 ff. (siehe auch Gefüge-, Schwind- und Temperaturspannungen)		
		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.		

Energieaufnahme (Forts.)	1978 / 32 ff.	Festigkeitsentwicklung (Forts.)	201 ff.	Feuerungsbau	1969 / 21 ff.
	1979 / 35 ff.		241 ff.		35 f.
	1981 / 143		273 ff.	Feuerwiderstandsklasse	
	1983 / 157 ff.	1963 / 45 f.	69 f.		1978 / 74 ff.
	1985 / 108 ff.		137 ff.	FIP-Kongress 1970	1970 / 133 ff.
	1991 / 57 ff.		169 ff.		
Enteisungsmittel	1979 / 65 f.	1964 / 77 ff.	162 ff.	Flachdach	1963 / 53 ff.
Entmischen	1961 / 114	1965 / 132	150	Flechtenbewuchs	1972 / 117 ff.
	1962 / 180 f.		155 ff.		
	1974 / 139	1966 / 115 ff.	1967 / 35 f.	Fließbeton	1974 / 21 ff.
Entsalzungsanlagen	1978 / 93 ff.	1969 / 67 ff.	1971 / 73 ff.		143 ff.
		1973 / 147 f.	1975 / 130		1977 / 87 f.
		1976 / 57 ff.	107 ff.	Fließestrich	1983 / 113 ff.
Epoxidharz	1962 / 73 ff.		155		
	1963 / 119 f.	1977 / 149 ff.	1978 / 43 ff.		1991 / 21 ff.
	1967 / 97 ff.	1988 / 183 f.	222 f.	Fließmittel	siehe Zusatzmittel
Erddämme	1962 / 64 ff.	1994 / 188 f.	1997 / 151		
	1973 / 41 ff.	2000 / 25 ff.	68 f.	Fließverhalten von Zementleim	1973 / 26 ff.
	1978 / 20 ff.	2003 / 68	159		1976 / 123 ff.
Erhärtungsprüfung	1962 / 83		162	Flotationsverfahren	1981 / 40 ff.
	1968 / 99 f.	2009 / 7 ff.	57 ff.		
	1971 / 65 ff.		71 ff.	Flugasche	1981 / 47
Erosionswiderstand	1969 / 115 ff.		93 ff.		1983 / 64 ff.
					1988 / 176 ff.
					1991 / 83 ff.
Erschütterungen (siehe auch Schlagfestigkeit)	1981 / 61 ff.				157 ff.
					1997 / 58 f.
					2003 / 150 f.
Erstarren	1961 / 132				171
	193				185
	1964 / 99 ff.				2009 / 7 ff.
	1968 / 28 f.				71 ff.
	1971 / 62 ff.				
	1981 / 145 ff.				
	1983 / 169 ff.				
	1985 / 119 ff.				
	131 ff.				
– Prüfverfahren	1981 / 147 ff.				
– Sulfatträger	1981 / 154 ff.				
	1983 / 173 ff.				
	1985 / 132 f.				
	1988 / 200				
Estrich	2009 / 93 ff.				
Fallrohrleitungen	1962 / 177 ff.				
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.				
Faserverteilung und -orientierung	1985 / 94 ff.				
Fehlerverteilungskurve	siehe Statistik				
Festigkeitsentwicklung	1960 / 29 ff.				
	1961 / 9 ff.				

Formänderungen (Forts.)

	2009 / 57 ff.
(siehe auch Alkalireaktion, Elastizitätsmodul, Frostdehnung, Kriechen, Quellen, Querdehnung, Schwinden, Wärmedehnung)	
Formsteine	1960 / 25 f. 1961 / 49 ff. 1963 / 173 ff.
Formsteinringe	1961 / 72 ff.
Formstein-Silo	1962 / 31 ff.
Fraktile	siehe Statistik
Fremdüberwachung	1972 / 197
Frischbeton	2003 / 159 2009 / 71 ff. 2015 / 87 ff.
– Analyse	1977 / 105 ff. 1981 / 33 ff.
– Recycling	2003 / 59 ff.
– Temperatur	2003 / 95 f.
Frostbeständigkeit	siehe Frostwiderstand
Frostdehnung	1960 / 119 1961 / 191 1962 / 164 1976 / 166
Frostschuttschicht	1961 / 223 f.
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)
– Prüfverfahren	1977 / 60 ff. 1994 / 37 f. 2000 / 85 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Frost-Tau-Wechsel-Prüfung	1962 / 93 ff.

Frost-Tau-Wechsel-Prüfung (Forts.)

	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.
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 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)
– Prüfverfahren	2000 / 85 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
Frühfestigkeit	siehe Festigkeitsentwicklung
frühhochfester Beton mit Fließmittel	1977 / 149 ff. 1983 / 113 ff.
Fugen (Massenbeton)	1968 / 170 ff.
Fugenabstand	1963 / 56 f. 1964 / 26 f. 37 1968 / 173
Fugenausbildung	1973 / 132 ff. 1981 / 56 ff.
Füller	1983 / 64 ff. 1988 / 175 ff.
Füllungsgrad	1978 / 60 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.
Gefrierverfahren (Tiefbau)	1962 / 142
Gefügeschädigung	1997 / 109 ff. 121 f. 136 f. 2000 / 116 f. 2006 / 17 ff.
Gefügespannungen	1960 / 75 ff. 1967 / 53 ff. 1972 / 135 ff. 2009 / 57 ff. (siehe auch Schwindspannungen und Temperaturspannungen)
Gehwegplatten	1965 / 161 ff. 208 f. 1966 / 49
Gelporen	siehe Porenraum
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.
Gesteinskörnung (früher „Zuschlag“)	1962 / 155 f. 1963 / 66 88 92 f. 111 ff. 1964 / 75 f.

Gesteinskörnung (Forts.) (früher „Zuschlag“)	1965 / 133 ff.	Gesteinskörnung (Forts.) (früher „Zuschlag“)		Haftfestigkeit	1962 / 76
	143				1964 / 118
	199				176 f.
	1966 / 89 ff.	– kristallwasserhaltige	1971 / 25 ff.		1967 / 66
	140		1975 / 21		2000 / 120 f.
	1967 / 29 f.	– Lagerstätten	1983 / 95 ff.	Haftmittel	1979 / 106
	1968 / 69		1997 / 117 ff.	Haufwerksporigkeit	2000 / 112 ff.
	91		133 ff.	Härte	1983 / 41 ff.
	1972 / 175 ff.	– leichte	1960 / 59	Häufigkeitsverteilung	siehe Statistik
	1975 / 92 ff.		127	heißer Zement	1961 / 132 f.
	1976 / 141 ff.		1964 / 140 f.	heißes Anmachwasser	1963 / 153 ff.
	1978 / 138 ff.		150 ff.	Hitzewiderstand	1972 / 192
	1979 / 68 ff.		1965 / 38 ff.	hochfester Beton	2003 / 157 ff.
	1983 / 17 ff.		101 ff.	(siehe auch Ultrahochfester Beton)	
	84 ff.		1967 / 57		
	95 ff.		1974 / 95		
	1985 / 42 ff.		111 ff.		
	122		121 ff.		
	2012 / 59 ff.		133 ff.		
	2015 / 49 ff.		1976 / 143		
	67 ff.				
– Alkali-Carbonat-Reaktion	1963 / 111	– Sand	2012 / 59 ff.	Hochleistungsbeton	
	1979 / 100 ff.	– schwere	1961 / 101 f.	– Säurewiderstand	2003 / 185 f.
	1997 / 145 ff.		125	Hochofenzement	1971 / 60 f.
– Alkali-Silikat-Reaktion			1976 / 142		1981 / 91 ff.
	1963 / 111	– Wassergehalt	1975 / 21 ff.		1983 / 75 ff.
	1964 / 116 f.		2003 / 50		2003 / 185
	1973 / 101 ff.	– Zement-Zuschlag-Reaktion	1979 / 99 f.		2009 / 7 ff.
	153 ff.				19 ff.
	1974 / 71 ff.	Gipsgehalt	1961 / 265		71 ff.
	1976 / 142	Gleitbeiwert	1967 / 122 ff.	Hüttenbims	1960 / 127
	1979 / 96 ff.	Griffigkeit	1967 / 121 ff.		1965 / 38 ff.
	1988 / 58 ff.		1979 / 80 ff.	Hüttensand	1971 / 60
	1997 / 109 ff.	Größtkorn	siehe Kornzusammensetzung		1983 / 64 ff.
	117 ff.	Grubenausbau	1960 / 26 f.		2003 / 133 ff.
	133 ff.		1961 / 49 ff.		150
	2006 / 69 ff.		1962 / 82		2009 / 7 ff.
– aus Altbeton	1983 / 17 ff.		188		71 ff.
	2003 / 47 ff.		1965 / 129 ff.		2012 / 7 ff.
– aus Reststoffen	1994 / 102		1970 / 23 ff.	Hydratation	1960 / 29 f.
	2003 / 29 ff.	– Richtlinien	1965 / 155 ff.		109
– Ausnutzbarkeit	1983 / 95 ff.	Gründungen	1962 / 142 f.		1961 / 44
– Betonsplitt	1983 / 17 ff.	grüner Beton	1971 / 151 ff.		201 ff.
– Eigenfeuchte	1966 / 89 ff.		1973 / 67 ff.		1962 / 24
	1974 / 91 ff.	Güteklassen			1963 / 47
	137	siehe Betongüte bzw. Zementnormenfestigkeit			1966 / 148
	1976 / 146	Güteprüfung	1961 / 273 ff.		1967 / 37 f.
– Einfluss des Größtkorns	1971 / 139 ff.		1962 / 83		1969 / 67 ff.
	1978 / 134 ff.		113		1976 / 107 ff.
– elastische Eigenschaften	1970 / 151		1968 / 100		150 ff.
	1983 / 23 ff.		1969 / 93 ff.		1981 / 152 ff.
	1994 / 207		1971 / 65 ff.		1983 / 63 ff.
– für Feuerbeton	1969 / 27		1972 / 111 f.		173 ff.
	35 f.		195 ff.		1988 / 200 ff.
– Frostwiderstand	1963 / 88		1973 / 150 f.		1994 / 116 f.
	1976 / 79 ff.		1997 / 21		2003 / 71 ff.
	142		2003 / 7		2006 / 55 ff.
	1979 / 63 ff.				2015 / 31 ff.
	1983 / 30			Hydratationswärme	1961 / 99 f.
					131
					1964 / 30 ff.
					1968 / 30
					1970 / 179 ff.
					1971 / 85 ff.

Hydratationswärme (Forts.)	1988 / 221 f. 1994 / 115 ff. 187 ff. 2000 / 61 ff. 73 2003 / 79 160 2009 / 19 ff.	Kanaldichtung	1978 / 22	Konsistenz (Forts.)	72 ff. 2000 / 42 f. 2003 / 66 99 103 119 f.
– Messverfahren	1970 / 185 ff. 1971 / 86 1994 / 125 ff.	Kapillarporen	siehe Porenraum		2006 / 7 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff. 93 ff. 2015 / 49 ff. 67 ff.
hydraulische Erhärtung	1983 / 63	Kavitationswiderstand	1969 / 115 ff.	– Prüfverfahren	1985 / 17 ff. 1991 / 43 ff. 2000 / 44 2003 / 107 f. 2006 / 7 ff.
hydraulischer Radius	1961 / 208	Kelly-Vail-Verfahren	1981 / 36 f.	– Vorhaltemaß	1985 / 120 144
Hydrophobierung	1975 / 118 ff.	keramischer Stabilisator	1969 / 27 f.	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)
ideal-elastischer Stoff	1978 / 34 ff.	Kernfeuchte	siehe Eigenfeuchte	Kontaktzone	1972 / 145 ff. 1978 / 47 ff. 1979 / 34 1983 / 51 ff.
Imprägnieren	1965 / 73 ff. 181 204 ff.	Kernreaktor	siehe Reaktorbau	Kornzusammensetzung	1960 / 112 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.
Inhibitor	1969 / 64	Kleben	1962 / 77 1963 / 122		
Injektionen	siehe Auspressen	Klinkerphasen	1961 / 44 1981 / 152 ff. 1983 / 63 172 2003 / 79 ff.		
Innenrüttler	1960 / 124 1962 / 87 ff.	Kochbehandlung	1961 / 274 ff.		
innere Oberfläche	1961 / 208	Kochversuch	1968 / 30 1971 / 77 f.		
Instandsetzung	siehe Ausbesserungen	Kolloidzement	1961 / 177		
ISO-Normung	1979 / 44 ff.	Kondenswasser	1962 / 39 ff. 1963 / 54 f.		
junger Beton	1971 / 151 ff. 1973 / 67 ff.	Konformität	2012 / 69 ff.		
Kälteschock	1970 / 70 f. 1981 / 24 ff.	Konsistenz	1961 / 113 242 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		
Kalkfahnen	siehe Ausblühungen				
Kalkgehalt	1960 / 83 1961 / 44 f. 1962 / 147 ff. 1967 / 27 ff. 1983 / 64 ff.				
Kalkhydrat	1962 / 105				
Kalkstein	1962 / 155 f. 1983 / 82 ff. 1985 / 43 f. 1991 / 171 ff. 195 f. 2006 / 29 ff. 2009 / 71 ff. 2012 / 7 ff. 2015 / 21 ff.				
Kalorimetrie	1970 / 181 ff. 1994 / 125 ff. 2000 / 61 ff.				
Kaltwasser-Versuch	1968 / 30 1971 / 80				

Korrosionsschutz (Forts.)

	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.
– Chloridgehalt	1970 / 36 f.
	1978 / 100 ff.
	1979 / 89 ff.
	2000 / 145 ff.
– Metall in Beton	1979 / 85 ff.
– Ursachen von Korrosion	1963 / 106 ff.
	1969 / 57 ff.
	1979 / 84 ff.
	1997 / 79
	2000 / 145 ff.
Kraftableitung	1967 / 53 ff.
	1971 / 35 f.
	123 ff.
	1972 / 135 ff.
	1976 / 152 f.
	1978 / 31 ff.
	1979 / 34
Krafteinleitung	siehe Lasteinleitung
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.
kritische Beanspruchung	1971 / 40 ff.
	1976 / 154
Kühlen des Betons	1964 / 38 ff.
Labormischer	1978 / 57 ff.
Lagerungseinfluss	1961 / 27 ff.
	134
	1962 / 124 ff.
	1963 / 69 ff.
	1964 / 78 ff.
	1965 / 150
	1966 / 128 ff.

Lagerungseinfluss (Forts.)

	166
	1968 / 120 ff.
	1970 / 114 ff.
	1975 / 128 ff.
	1994 / 119 f.
	(siehe auch Nachbehandlung)
Lasteinleitung	1963 / 73
	1964 / 63
	80 ff.
	1971 / 38
	123 ff.
Lastkollektiv	1981 / 133 ff.
Le-Chatelier-Versuch	1971 / 78 f.
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)
– Anwendungsgebiete	1964 / 133 ff.
– Bemessung	1964 / 142
	177 ff.
	1991 / 57 ff.
– Eigenschaften	1960 / 130 ff.
	1964 / 160 ff.
	1965 / 53 ff.
	106 ff.
	1967 / 59 ff.
	1974 / 123 ff.
– Eignungsprüfung	1974 / 126 ff.
– Erzeugung in den USA	1964 / 132 f.
– Kraftfluss	1967 / 53 ff.
	1971 / 35 f.
	123 ff.
	1972 / 143 ff.
– Kriechen	1974 / 91 ff.
– Merkblätter	1974 / 111 ff.
– Mischungsaufbau	1964 / 153 ff.
	1965 / 104 ff.
	1967 / 61 f.
	1974 / 112 ff.
	122 ff.
	134 ff.
	1976 / 139 ff.
– Normung in den USA	1964 / 140 ff.
– Schwinden	1974 / 91 ff.
– Spannbeton	1964 / 179 f.

Leichtbeton (Forts.)

– Wirtschaftlichkeit	1964 / 138 ff.
– Zuschlag	siehe Gesteinskörnung, leichte
Leimgehalt	2015 / 87 ff.
Leitfähigkeit, elektrische	1994 / 11 ff.
	1997 / 84 ff.
Liegezeit	1979 / 19 ff.
	2015 / 49 ff.
	67 ff.
Lösungsgeschwindigkeit, spezifisch	1988 / 123 ff.
	145 f.
LP-Beton	siehe Frost-Tausalz-Widerstand
LP-Zement	1962 / 131
	1964 / 106
luftelektrische Felder	1975 / 143 ff.
	1978 / 157 ff.
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
	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.
	2015 / 7 ff.
– Messverfahren	1962 / 171
	1963 / 128 ff.
	1966 / 82 f.
	1975 / 51 f.
	1977 / 60 ff.
	1979 / 68
	2009 / 39 ff.
	2015 / 7 ff.
Luftporenbeton	2015 / 7 ff.

Luftporenbildung	1961 / 245 f. 1962 / 168 1965 / 194 ff. 2009 / 39 ff. 2012 / 19 ff. 41 ff.	Merkblätter (Forts.) (siehe auch Richtlinien)	NA-Zement (Forts.)	1997 / 118 2003 / 133 ff.
Luftporen-Kennwerte	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. 2015 / 7 ff.	– Anstriche auf Beton von Wasser-Sammelanlagen 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
– Berechnung	1981 / 177 ff.	– Bodenverfestigung im Wasserbau 1978 / 17 ff.	(siehe auch Oberflächenbehandlung)	
– Messverfahren	1981 / 173 ff.	– Dampfmischen 1974 / 151 ff.	Nacherhärtung	siehe Festigkeitsentwicklung
Luftschalldämmung	1976 / 18 ff.	– Deckwerksteine 1967 / 143 ff.	Nachhaltigkeit	2003 / 29 ff.
Mahlfeinheit	1961 / 181 ff. 1968 / 29 1971 / 81 ff. 1976 / 68 116 f. 1983 / 66 ff. 1997 / 75	– Hydratationswärme 1970 / 179 ff.	Nachmischen	1963 / 38 44 1979 / 23 f.
Maracaibo-Brücke	1962 / 143 f. 1964 / 199	– Leichtbeton und Stahlleichtbeton I 1974 / 111 ff.	Nachverdichten	1960 / 117 125 1961 / 262 1971 / 109 ff. 1981 / 66 ff.
Maßeinheiten	1978 / 105 ff.	– Leichtbeton und Stahlleichtbeton II 1974 / 121 ff.	Neutronenstreuung	1981 / 36
Massenbeton	1961 / 89 f. 99 f. 117 ff. 1964 / 21 ff. 1968 / 145 ff.	– Leichtbeton und Stahlleichtbeton III 1974 / 133 ff.	Newtonsches Fließgesetz	1972 / 53 1973 / 23 ff. 1976 / 124 ff.
Meerwasserbauten	1963 / 102 1966 / 39 ff. 1967 / 31 f. 1968 / 33 ff.	– Öleinwirkungen 1966 / 169 ff.	Normalverteilung	siehe Statistik
Meerwasserentsalzungsanlagen	1978 / 93 ff.	– Schutzüberzüge 1973 / 125 ff.	Normen	siehe Baunormen
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)	– Spaltenböden 1966 / 69 ff.	Normenfestigkeit	siehe Zementnormenfestigkeit
Merkblätter (siehe auch Richtlinien)		– Wärmebehandlung 1967 / 35 ff.	Normenmörtel	1962 / 132 1968 / 25 1969 / 53 1971 / 65 ff.
– Anstriche	1974 / 157 ff.	– Zementeinpressungen 1970 / 21 ff.	Oberflächenbehandlung	1961 / 267 1963 / 94 f. 103 ff. 1967 / 99 ff. 1973 / 127 f. 1974 / 158 f. 1981 / 52 f.
		MgO-Gehalt 1971 / 80	(siehe auch Anstriche, Beschichten, Imprägnieren)	
		Mikrohärteprüfung 1983 / 41 ff.	Oberflächenfeuchte	siehe Eigenfeuchte
		Mischbinder 1960 / 103		
		Mischen 1963 / 35 44 ff. 1972 / 194 1974 / 151 ff. 1976 / 147 f. 1978 / 57 ff. 1981 / 63 f. 1985 / 124 144 f.		
		Mischergröße 1978 / 63 ff.		
		Mischungsentwurf siehe Betonzusammensetzung bzw. Stoffraumrechnung		
		Mischzeit 1963 / 61 ff. 1964 / 159 1976 / 147 1981 / 160 f. 1985 / 144 f. 2003 / 94 99 2009 / 39 ff. 2015 / 7 ff.		
		Model Code 1979 / 52 ff.		
		NA-Zement 1973 / 110 ff. 161 ff. 1974 / 76 ff.		

Oberflächentextur	1967 / 121 ff.	Porenwasser (Forts.)	2003 / 81 148	Quellzement (Forts.)	1965 / 21 f. 1976 / 140
Ocratieren	1962 / 29 1967 / 99		2009 / 19 ff.	Querdehnung	1964 / 169 1968 / 73 ff. 1971 / 39 ff. 123 ff. 1972 / 151 ff. 1978 / 49 f. 1979 / 39 1985 / 110 f.
Ökobilanz	2000 / 141 f. 2015 / 21 ff.	Portlandzementklinker	1961 / 44 1971 / 60 1981 / 152 ff. 1983 / 63 ff. 172 2009 / 7 ff. 71 ff. 93 ff.	radioaktive Strahlen	1961 / 96
Öleinwirkung	1963 / 98 f. 1966 / 169 ff. 1967 / 22 1968 / 130			Rammpfähle	siehe Betonpfähle
Passivierung	1969 / 60 1972 / 127	Portlandkalksteinzement	2000 / 15 ff. 2003 / 174 2006 / 29 ff. 2009 / 19 ff. 71 ff.	RAM-Verfahren	1981 / 38 ff.
Performance-Prüfung	2015 / 39 ff. 95 ff.			Raumbeständigkeit	1962 / 153 1968 / 30 1971 / 76 ff.
Permeabilität	1988 / 37 ff. 81 ff. 1994 / 62 105 177	Portlandkompositzemente	2006 / 29 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff. 93 ff.	Raumgewicht	siehe Rohdichte
Pfähle	siehe Betonpfähle			Reaktorbeton	siehe Strahlenschutzbeton
Pfahlgründung	1962 / 143	Probenzahl	siehe Statistik	Recycling	1988 / 144 159 ff. 1994 / 102 f. 2003 / 29 ff. 47 ff. 2006 / 55 ff.
pH-Wert	1960 / 86 1962 / 147 ff. 1967 / 36 1969 / 57 1972 / 126 f.	Prüfung von Baustoffen		Regelkonsistenz	1985 / 120
		– AKR-Performance-Prüfung	2012 / 81 ff.	Reife	1961 / 10 ff. 1963 / 172
		– Konformitätsprüfung	2012 / 69 ff.	Relaxation	1971 / 169 ff. 2000 / 65 f.
Phasenneubildungen	1988 / 207 ff. 218 227 1994 / 82	– Performance-Prüfverfahren	2012 / 69 ff.	Restfestigkeit	1981 / 26 f.
Pilzbewuchs	1972 / 117 ff.	– Prüfkörperabmessungen	siehe Gestaltungseinfluss	Restwasser	2000 / 49 ff. 2003 / 59 ff.
Polymerbeton	1976 / 164	– Prüfmaschinen-Umstellung	1978 / 116 ff.	Rheologie von Zementleim und Frischbeton	1973 / 21 ff. 1974 / 24 ff. 1976 / 123 ff. 1985 / 132 ff. 1997 / 33 45 61 ff. 2000 / 39 ff. 2003 / 104 115 126 f. 2006 / 7 ff. 2012 / 7 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. 1976 / 109 ff. 150 1983 / 47 66 1988 / 53 f. 79 1991 / 127 ff. 1994 / 63 2003 / 200 2006 / 17 ff. 2009 / 7 ff. 19 ff. 71 ff. 2015 / 31 ff.	– WS-Grundprüfung	2012 / 81 ff.	Richtlinien	(siehe auch Merkblätter)
		Pumpbeton	siehe Fördern des Betons	– Alkalireaktion	1974 / 71 ff. 2006 / 69 ff. 2012 / 59 ff. 2015 / 39 ff.
		Puzzolan	1964 / 113 1983 / 64	– Fließbeton	1974 / 143 ff.
		Puzzolanzusatz	1960 / 101 ff. 1964 / 31 f. 113 ff. 1979 / 74 2003 / 150	– Gärfuttersilos	1962 / 33 ff.
		PVC-Brände	1970 / 33 ff.	– Grubenausbau	1965 / 155 ff.
		Qualitätsmanagement	1997 / 21		
		Quarzsand	1983 / 84 ff.		
		Quellen	1964 / 111 f. 1971 / 80 2000 / 93 ff.		
Porenwasser	1981 / 21 ff. 1994 / 101 1997 / 39	Quellzement	1964 / 109 ff.		

Richtlinien (Forts.)	(siehe auch Merkblätter)	Schadstoffe, organische (Forts.)	Schwinden (Forts.)
– Spritzbeton	1966 / 177 ff.	2000 / 123 ff.	159 2009 / 19 ff. 57 ff.
– Wirksamkeitsprüfung von Zusatzmitteln	1975 / 47 ff.	Schalenneisse	1961 / 99 1964 / 24 1968 / 161 f.
RILEM-Empfehlungen	1979 / 48 ff.	Schallschutz	1976 / 17 ff.
Risse	1960 / 23 79 1961 / 99 133 f. 1963 / 106 1964 / 21 ff. 1966 / 44 ff. 1968 / 161 ff. 1970 / 83 ff. 1971 / 40 ff. 1972 / 137 ff. 1973 / 67 ff. 1976 / 161 f. 1978 / 45 ff. 1979 / 13 ff. 1988 / 202 f. / 217 226 1994 / 181 ff. 1997 / 109 ff. 136 f. 2000 / 61 ff. 73 ff. 93 2003 / 165 2009 / 57 ff.	Schalung	1962 / 30 55 f.
Rissüberbrückung	1962 / 77 1963 / 121	Schaumbeton	1964 / 108
Robustheit	2015 / 87 ff.	Scheinfugen (Massenbeton)	1968 / 171
Rohdichte	1960 / 62 f. 127 ff. 1961 / 106 f. 1964 / 155 160 ff. 208 f. 1965 / 36 f. 106 1971 / 24 f. 1976 / 139	Schieferton	1964 / 143 ff.
Rohrinnenkühlung	1964 / 41 ff.	Schildvortrieb	1962 / 145
Rostschutz	siehe Korrosionsschutz	Schlagfestigkeit	1962 / 144 1968 / 49 ff. 1979 / 36 ff. 1981 / 101 ff. 1983 / 158
Rüttelflasche	1960 / 124 1962 / 87 ff.	Schlammverfestigung mit Zement	1979 / 113 ff.
Rütteltisch	1960 / 60 65 ff.	Schnellprüfverfahren	1981 / 34 ff.
Säureangriff	siehe chem. Widerstandsfähigkeit	Schnellzement	1976 / 119 f. 140
Schachtausbau	1960 / 25 1962 / 81 177 ff. 1963 / 173 f. 1970 / 23 ff.	Schrumpfen	1961 / 133 1973 / 67 ff. 1976 / 161 f. 1979 / 13 ff. 1983 / 99 ff. 2009 / 57 ff.
Schadstoffe, organische	1994 / 106	Schubfestigkeit	1964 / 167 1965 / 110
		Schutzüberzüge	siehe Betonschutz
		– Merkblatt	1973 / 125 ff.
		Schwermetalle	1988 / 143 ff. 173 f.
		Schwinden	1960 / 73 ff. 134 1961 / 235 ff. 1963 / 24 1964 / 172 f. 1965 / 56 ff. 108 f. 1967 / 40 f. 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
			(siehe auch Kornzusammensetzung)
		SI-Einheiten	1978 / 105 ff.
		Silicastaub	2003 / 125 ff. 152 185 2009 / 57 ff.
		Silos	1961 / 215 ff. 1962 / 23 ff. 33
		Sinterbims	1965 / 39 ff.
		Sorption	2012 / 7 ff.
		Spaltenböden	1966 / 57 ff. 69 ff.
		Spaltrisse	1961 / 99 1964 / 25 f. 1968 / 146 ff.
		Spaltzugfestigkeit	1963 / 61 f. 79 f. 1964 / 59 ff. 166 f. 1970 / 103 ff. 1981 / 114 1983 / 137 ff. 158 1985 / 108 2009 / 57 ff.
		– Einflussgrößen	1964 / 73 ff.

Spaltzugfestigkeit (Forts.)

 – Prüfverfahren 1964 / 66 f.
80 ff.

 – bei tiefen 1970 / 62 ff.
Temperaturen

 Spannbetonstraße 1961 / 232
1965 / 21 ff.

 Spannungs-Dehnungs- 1974 / 48
Linien 1978 / 37 ff.
1979 / 38
1981 / 22 ff.
1983 / 158 f.
1985 / 108 ff.
1991 / 57 ff.
1994 / 188 f.

Spannungsrisskorrosion 1969 / 58 f.

 Spannungsverteilung 1970 / 83 ff.
1972 / 135 ff.
1981 / 138 ff.
2009 / 57 ff.

spezifische Oberfläche siehe Mahlfineinheit

 Spritzbeton 1966 / 177 ff.
1971 / 99
1973 / 139 ff.
1983 / 155 ff.
1994 / 183

 Spritzmörtel 1963 / 119 ff.
1966 / 177 ff.

Spundwände 1962 / 72

Stabilität 2015 / 87 ff.

Stahlfaserbeton 1985 / 73 ff.

Stahlfaserspritzbeton 1983 / 155 ff.

 Stahlleichtbeton
siehe Konstruktions-Leichtbeton

Standardabweichung siehe Statistik

Standspuren 1962 / 166

 Startbahnen 1961 / 231
2012 / 81 ff.

 Statistik 1960 / 91 ff.
1964 / 188 ff.
1969 / 85 ff.
1997 / 25 f.

 Stauraumdichtung 1962 / 63 ff.
141
1973 / 41 ff.

Steife siehe Konsistenz

 Stoffraumrechnung 1960 / 109 f.
1961 / 105 ff.
1963 / 130 ff.
1965 / 139 f.

Stoffraumrechnung (Forts.)

1976 / 137

 Strahlenschutzbeton 1961 / 91 ff.
299 ff.

1964 / 47 ff.

1971 / 21 ff.

1975 / 17 ff.

 1976 / 31 ff.
168

– Zusätze 1961 / 105

 Straßenbau 1961 / 221 ff.
2000 / 93
111

 – hydraulisch geb. 1988 / 155
Tragschicht 159 ff.
1994 / 11 ff.
102 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.

– Dränbeton 2000 / 111 ff.

Streckenausbaue siehe Grubenausbaue

Suevit-Trass-Zement 1960 / 102

Sulfat 2012 / 7 ff.

Sulfatträger siehe Erstarren

 Sulfatwiderstand
siehe chemische Widerstandsfähigkeit

Synchrotronbau 1961 / 301

 Tausalz 1962 / 161 ff.
1965 / 189 f.

 Tausalzwiderstand
siehe Frost-Tausalz-Widerstand

Tauwasser siehe Kondenswasser

Tellermischer 1978 / 60

 Temperaturbean- 1970 / 57 ff.
spruchungen 1981 / 19 ff.
141 ff.

(siehe auch Frostdehnung und Wärmedehnung)

Temperatureinfluss siehe Betontemperatur

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)

Tetrapoden 1962 / 72

Ton(schiefer) 1964 / 143 ff.

 Tragverhalten 1972 / 135 ff.
1978 / 31 ff.
1981 / 138 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.

2015 / 49 ff.

67 ff.

 Trass 1960 / 101 ff.
1971 / 60 f.
1983 / 64 ff.

 Trasszement 1960 / 102
1971 / 60 ff.
1983 / 77 ff.

Trasszusatz 1960 / 101 ff.

 Treiben 1962 / 153
1968 / 30
1971 / 80 ff.

Trinkwasserbehälter 2003 / 191 ff.

Trittschalldämmung 1976 / 26 f.

Trockendocks 1962 / 144

Trocknungsrisse 1973 / 76 ff.

 Tunnelbau 1962 / 145
1964 / 51 f.
1994 / 181 ff.
2000 / 73 ff.

Überdeckung siehe Korrosionsschutz

 Uferbefestigung 1962 / 63 ff.
67 ff.

Uferbefestigung (Forts.)	1967 / 143 ff. 1968 / 33 ff. 1971 / 89 ff. 1978 / 20 ff.	Verzögerer	siehe Zusatzmittel	Wassergehalt (Forts.)	1966 / 90 1971 / 155 ff. 1973 / 87 ff. 1974 / 153 1975 / 17 ff. 107 ff. 1976 / 138 ff. 1978 / 121 ff. 2015 / 49 ff. 67 ff.
Ultrahochfester Beton	2009 / 57 ff.	Wärmebehandlung	1960 / 29 ff. 1961 / 273 ff. 1963 / 169 ff. 1964 / 163 ff. 1967 / 35 ff. 51 f. 1988 / 199 ff. 215 ff.	(siehe auch Betonzusammensetzung und Konsistenz)	
Ultraschall-Prüfung	1994 / 39	Wärmedämmung	siehe Wärmeschutz	– Prüfung	1977 / 106 ff. 1981 / 36 f.
Umrechnung von Festigkeiten	siehe Festigkeitsvergleich und Festigkeitsverhältnis	Wärmedehnung	1960 / 132 f. 1961 / 210 f. 1962 / 106 f. 1964 / 174 1967 / 38 f. 1969 / 24 f. 35 f. 1970 / 67 1976 / 162	Wasserrückhalte- vermögen	1973 / 67 ff. 1979 / 16 ff.
Umweltschutz	1988 / 143 ff. 159 ff. 1991 / 107 ff. 1994 / 53 ff. 89 ff. 151 ff. 213 ff. 2000 / 135 ff.	Wärmeentwicklung	siehe Hydrationswärme	Wasserstoffversprödung	1969 / 59
Unterwasserbeton	1966 / 187 ff. 1972 / 192	Wärmeleitfähigkeit	1960 / 134 f. 1964 / 32 f. 174 1965 / 110 f. 1970 / 68 ff. 1974 / 125 1976 / 44 ff.	Wasserundurchlässigkeit	siehe dichter Beton
Vakuumbeton	1976 / 139	Wärmeschutz	1963 / 54 ff. 1976 / 39 ff.	– Prüfverfahren	1966 / 146 f. 1988 / 50 ff.
Variationskoeffizient	siehe Statistik	(siehe auch Wärmeleitfähigkeit)		Wasserzementwert	siehe Betonzusammensetzung
Vebe-Zeit	1985 / 18 ff. (siehe auch Konsistenz)	Wasserabsondern	2015 / 87 ff.	– Prüfung	1977 / 107 ff. 1981 / 35 ff.
Verankerungskörper	1964 / 53	Wasseranspruch	1965 / 135 ff. 1972 / 113 ff. 1978 / 121 ff. 1991 / 200 2009 / 71 ff.	– wirksamer	1961 / 200 ff. 1962 / 136 170 1974 / 124
Verarbeitbarkeit	siehe Konsistenz	Wasseraufnahme	1960 / 116 1964 / 154 174 ff. 1965 / 180 f. 1975 / 113 ff. 1988 / 220 1991 / 206 1994 / 61 2006 / 17 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.
Verdichten	1960 / 59 ff. 65 ff. 122 ff. 1962 / 83 ff. 1964 / 159 207 ff. 1965 / 148 ff. 1971 / 155 ff. 1976 / 149	Wasserbindung	1960 / 108 f. 1961 / 204 1962 / 105 1971 / 24 1975 / 19 ff. 1991 / 200 f.	Wasserzementwert- Tafeln	1972 / 165 ff.
Verdichtungsmaß	1964 / 207 ff. 1985 / 18 ff. 2009 / 71 ff. (siehe auch Konsistenz)	Wasserbau	1961 / 267 ff.	Wegebau	1961 / 227 ff.
Verflüssiger	siehe Zusatzmittel	Wasserdampfdiffusion	1975 / 112 f.	Widerlager	1964 / 53 1968 / 145 ff.
Verformungen	siehe Formänderungen	Wassergehalt	1962 / 169 f. 181 1964 / 156 ff. 208 ff. 1965 / 139	Winterbau	1963 / 153 1968 / 99
Verformungs- charakteristik	1970 / 65 ff. 1971 / 46 f. 1974 / 48 ff. 1978 / 34 ff. 1979 / 38 1981 / 22 ff. 1983 / 156 ff. 1991 / 57 ff. (siehe auch Belastungsgeschwindigkeit)	Witterungsbeständigkeit			1972 / 33 ff. 1976 / 164 f. 1981 / 141 ff.
Verpressen	siehe Auspressen	Wöhlerlinie	1981 / 130 ff.	Zeitfestigkeit	1981 / 135 f.
Verschleißwiderstand	siehe Abnutzwiderstand				
Verzinkung	1969 / 63 1979 / 86				

122	Zement		Zement (Forts.)		Zementgemische	1961 / 271 f. 1964 / 99 2015 / 21 ff. 31 ff.
	– Alter	1961 / 190 196	– Sulfatgehalt	1981 / 155 f. 1988 / 205		
	– Alkaligehalt	1997 / 128 138 145 2003 / 133 ff.	– Sulfatträger	1981 / 154 ff. 1983 / 171 ff. 1985 / 132 f. 1988 / 212	Zement-Flugasche- Gemische	2003 / 171 174 2009 / 7 ff.
	– amerikanischer	1962 / 131 1964 / 31 1966 / 21 ff.	– Temperatur	1961 / 132 f.	Zementeinbindung	1988 / 143 ff. 172 f. 1994 / 89 ff.
	– 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.	– Zumahlstoffe	1983 / 82 ff. 1991 / 174 f. 194 f. 2003 / 133 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Zementinjektionen	siehe Auspressen
	– Bestandteile	1983 / 61 ff. 172 1988 / 68 f. 1994 / 21 f. 81 1997 / 10 ff. 2003 / 13 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.	Zementanwendung	2003 / 12 23 f. 2009 / 93 ff.	Zementklinker	1961 / 44 1971 / 60 1981 / 152 ff. 1983 / 63 ff. 172 2003 / 74
	– Eigenschaften	1997 / 13 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.	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. 2015 / 49 ff. 67 ff.	– Scherwiderstand	1997 / 51 ff. 2003 / 7 ff. 133 ff. (siehe auch Rheologie von Zementleim und Frischbeton sowie Zementsuspension)
	– Erstarrungsverhalten	1981 / 145 ff. 1983 / 169 ff. 1985 / 121 f. 131 ff. (siehe auch Erstarren)	(siehe auch Kolloidzement, LP-Zement, NA-Zement, Quellszement, Schnellzement, Suet- vit-Trass-Zement, Trasszement, Zementklinker sowie – unter chem. Widerstandsfähigkeit – Zement- mente mit hohem Sulfatwiderstand)		Zementnorm	1968 / 21 ff. 1971 / 55 ff. 1976 / 139 f. 1997 / 7 ff. 2000 / 7 ff. 2009 / 7 ff. 71 ff.
	– Füller	1983 / 64 ff.	Zementeigenschaften	2003 / 11	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.
	– Granulometrie	1983 / 61 ff. 2000 / 25 ff. 2009 / 7 ff. 71 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.
	– heißer	1961 / 132 f.	– Prüfung	1977 / 106 ff. 1981 / 37 ff. 1994 / 11 ff.		
	– Optimierung	1985 / 117 131 147 2009 / 7 ff. 71 ff.				
	– Portlandkalksteinzement	2012 / 69 ff.				
	– Prüfverfahren	1971 / 57 ff. 1997 / 22 f.				
	– Reaktivität	2000 / 25 ff.				
	– Sulfatgehalt	1971 / 80 f.				

Zementstein (Forts.)	1997 / 39 f. 2009 / 19 ff.	Zugfestigkeit (Forts.)	1976 / 156 1981 / 114	Zusatzmittel (Forts.)	
– elastische Eigenschaften	1970 / 149 ff. 1978 / 42 ff.	(siehe auch Biegezugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit)		– LP-Bildner (Forts.)	1975 / 40 ff. 1977 / 64 1991 / 204 1997 / 91 f. 2003 / 87 ff. 2009 / 39 ff. 2012 / 19 ff. 41 ff. 2015 / 7 ff.
– Erhärtungsgeschwindigkeit	1969 / 74 ff. 1976 / 114 ff. 1994 / 117	Zumahlstoff	1983 / 82 ff. 1991 / 174 f. 195 f. 2009 / 7 ff. 71 ff.	– Superverflüssiger	siehe Fließmittel
– Faserzusatz	1969 / 78 ff. 1974 / 45 ff. 1979 / 31 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. 19 ff. 41 ff. 2015 / 7 ff. 49 ff. 67 ff.	– Verflüssiger	1961 / 241 ff. 1964 / 102 ff. 1975 / 39 f. 1979 / 17 ff. 1985 / 122 f. 1991 / 204 1997 / 33 45 94 f.
– Festigkeitsbildung	1961 / 201 ff. 1969 / 67 ff. 1976 / 108 ff. 1978 / 43 ff. 1981 / 154 ff.	– Beschleuniger	1964 / 99 ff. 1973 / 142 ff. 1975 / 44	– 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.
– Festigkeitssteigerung durch elektr. Verfahren	1969 / 135 ff.	– Dichtungsmittel	1964 / 117 f. 1975 / 42 f. 105 ff. 1977 / 64	– Wirksamkeitsprüfung	1975 / 33 ff. 47 ff.
– Formänderungen	1978 / 42 ff. 2009 / 19 ff. 57 ff.	– Einpresshilfen	1975 / 44 f.	– Elution	1997 / 39 ff.
– Frosteinwirkung	1963 / 87 f. 1979 / 62 f.	– Fettalkohol	1979 / 24 ff.	– Sorption	1997 / 37 ff.
– Gefüge	1983 / 61 ff. 170 ff. 1988 / 53 81 f. 149 f. 202 f. 1991 / 107 ff. 1997 / 39 f.	– 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 94 f. 2003 / 91 ff. 125 ff. 2012 / 7 ff. 41 ff. 2015 / 49 ff. 67 ff.	– RR/UV-Spektroskopie	1997 / 34 ff.
– Korrosion	2003 / 192 f.			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.
– Schichtdicke	1967 / 69 1968 / 68			– k-Wert	2012 / 69 ff.
– bei hohen Temperaturen	1969 / 28 ff. 35 1975 / 23 ff.			– organische	1994 / 166 2000 / 113 f.
– Tragverhalten	1978 / 42 ff.			Zuschlag	siehe Gesteinskörnung
– Wassergehalt	1975 / 19 ff. 107 ff.				
– Wassertransport	1975 / 109 ff.				
Zementsuspension	1961 / 177 ff. 1962 / 141 1970 / 21 ff. 1972 / 51 ff. 1973 / 21 ff. 1976 / 123 ff. 1994 / 18 f.	– Langzeitverzögerer	2006 / 55 ff.		
Zeta-Potential	2012 / 7 ff.	– LP-Bildner	1960 / 9 ff. 118 1962 / 131 160 ff. 1964 / 104 ff. 1965 / 167		
Zugabewasser	siehe Anmachwasser				
Zugfestigkeit	1962 / 106 f. 1963 / 60 f. 79 f. 1964 / 59 ff. 1970 / 99 ff.				

Zwangzugspannungen	1994 / 181
	2000 / 64 f.
	76 f.
	2003 / 164
	2009 / 57 ff.

Zwischenlagen	1960 / 27
	1961 / 49 ff.



VDZ
Postfach 30 10 63
D-40410 Düsseldorf
Tannenstraße 2
D-40476 Düsseldorf

VDZ
P.O. Box 30 10 63
40410 Duesseldorf, Germany
Tannenstrasse 2
40476 Duesseldorf, Germany