

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 praxisergeiche 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-

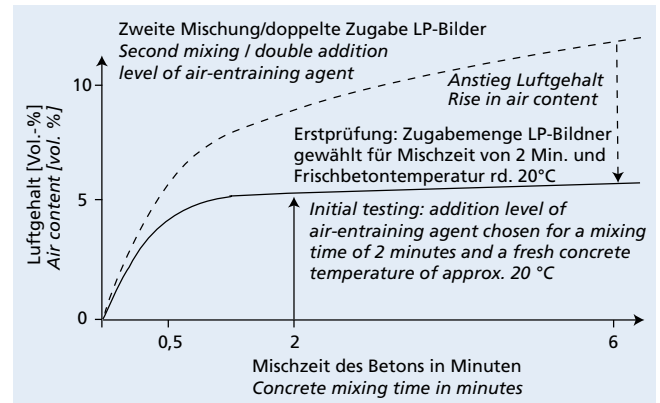


Bild 1: Prüfung des Nachaktivierungspotenzials einer Betonzusammensetzung bei der Erstprüfung im Labor [1]

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 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 <i>Active substance basis of air-entraining agent</i>	Feststoffgehalt LP-Bildner in M.-% <i>Solids content of air-entraining agent in mass %</i>	Zugabemenge in M.-% v. z <i>Quantity added in mass % w.r.t. cement</i>		Luftgehalt in Vol.-% <i>Air content in vol. %</i>		Verdichtungsmaß <i>Compacting factor</i>	
		LP-Bildner <i>Air-entraining agent</i>	Wirkstoff <i>Active substance</i>	10 min	30 min	10 min	30 min
Mod. Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	4,12	0,30	0,012360	5,3	4,5	1,24	1,27
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfate</i>	1,69	0,30	0,005100	5,5	4,8	1,21	1,23
Alkylpolyglycoethersulfat <i>Alkyl polyglycol ether sulfate</i>	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 eingelegerter 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-Bearbeitung mit täglich zwei Wechslen (geschaltete Teflonscheibe als Prüffläche). Nach i.d.R. 7, 14 und 28 Frost-Tau-Wechslen 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

10

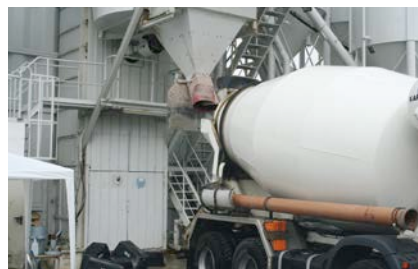


Bild 2: a) Übersicht über Mischanlage, Fahrmischer und Baustellenlabor; b) Ablassen von Frischbeton nach definierten Mischzeiten in den Fahrmischer; c) Ablassen des Frischbetons aus dem Fahrmischer in Mörtelwannen
Figure 2: a) General view of mixing plant, truck mixer and site laboratory; b) unloading 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-Tellermischer 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 Fahrmixer abgelassen (Bilder 2 a bis c). Der Fahrmixer 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 <i>Active substance basis of air-entraining agent</i>	28-Tage-Druckfestigkeit in N/mm ² <i>28-day compressive strength in N/mm²</i>	Rohdichte in kg/dm ³ <i>Bulk density in kg/dm³</i>	Abwitterung nach 28 FTW in g/m ² <i>Scaling loss after 28 freeze-thaw cycles in g/m²</i>	LP-Kennwerte am Festbeton <i>Air void parameters in hardened concrete</i>		
				Luftgehalt in Vol.-% <i>Air content in vol. %</i>	Mikroluftporengehalt in Vol.-% <i>Micro air void content in vol. %</i>	Abstandsfaktor in mm <i>Spacing factor in mm</i>
Mod. Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	60,9	2,27	133	6,20	2,23	0,17
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfates</i>	56,9	2,27	157	5,86	2,77	0,16
Alkylpolyglycolethersulfat <i>Alkyl polyglycol ether sulfates</i>	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,

12

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 <i>Active substance</i>	Mischzeit <i>Mixing time</i>	Luftgehalt in Vol.-% <i>Air content in vol. %</i>		Luftgehalt in Vol.-% <i>Air content in vol. %</i>		Luftgehalt in Vol.-% <i>Air content in vol. %</i>	
		Labor <i>Laboratory</i>	Werk <i>Plant</i>	Labor <i>Laboratory</i>	Werk <i>Plant</i>	Labor <i>Laboratory</i>	Werk <i>Plant</i>
		Zugabemenge: einfach <i>Addition level: single</i>		Zugabemenge: doppelt <i>Addition level: double</i>		Zugabemenge: dreifach <i>Addition level: triple</i>	
Modifiziertes Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	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
	15 min	6,2	–	6,3	–	8,7	–
Alkylsulfat <i>Alkyl sulfates</i>	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
	10 min	6,2	4,3	10,5	9,5	13,5	14,5
	15 min	6,2	–	11,0	–	16,0	–
Alkylpolyglycolethersulfat <i>Alkyl polyglycol ether sulfates</i>	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 ± 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

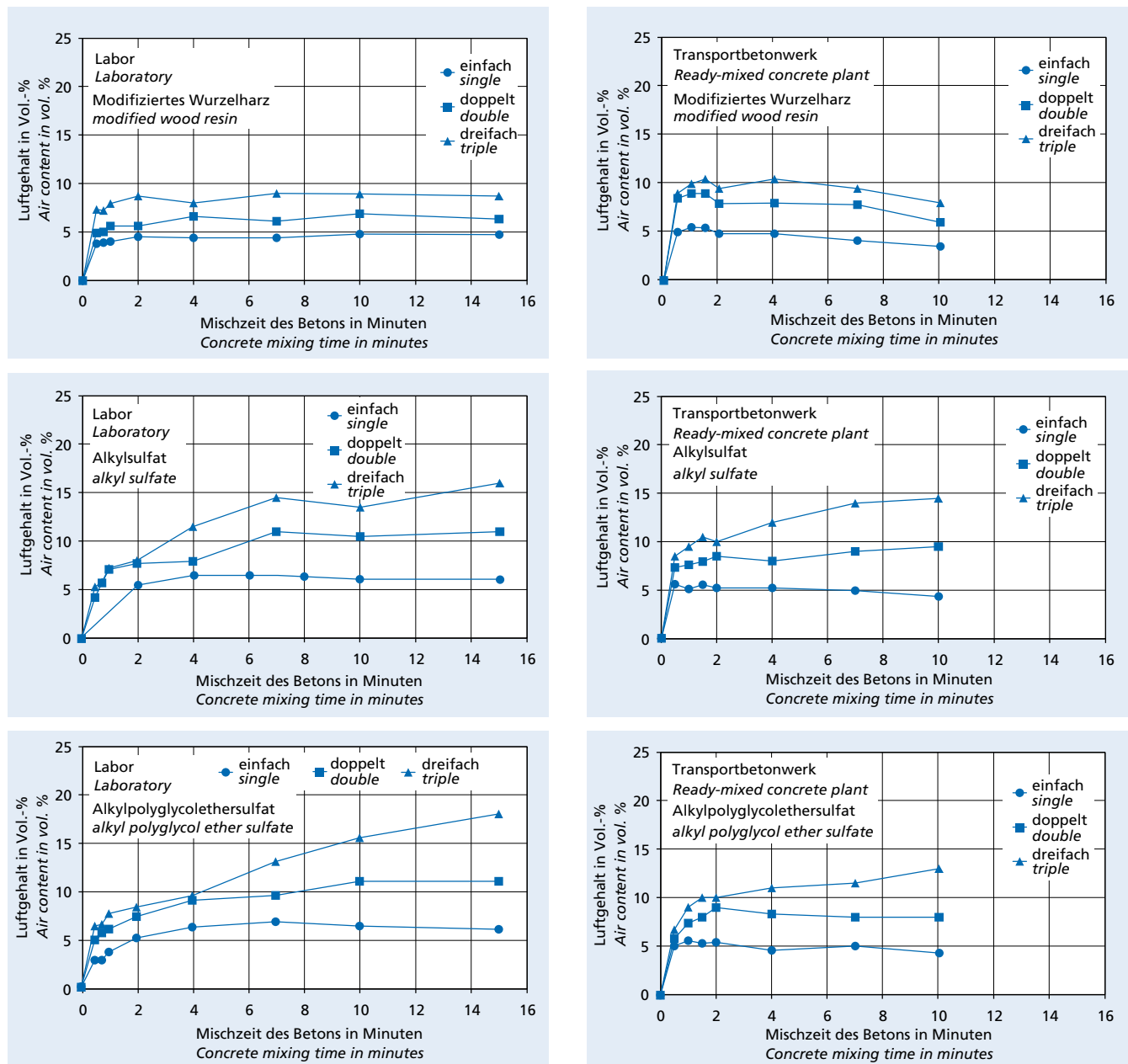


Bild 3: Luftgehalt des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Wirkstoffbasis und der Zugabemenge des LP-Bidners (links: Labor, rechts: Transportbetonwerk)

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 Jutuch 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
	Mikroluftporengehalt 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
	Mikroluftporengehalt 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
Alkylpolyglycoethersulfat <i>Alkyl polyglycoether 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
	Mikroluftporengehalt 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>Airentraining 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. mass % w.r.t. cement	–	°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 Alkylpolyglycol-ethersulfat die geringste Menge zugegeben. 30 Minuten nach dem Ende der Mischzeit betrug das Verdichtungsmaß 1,23 (Wurzelharz), 1,24 (Alkylsulfat) bzw. 1,27 (Alkylpolyglycol-ethersulfat), 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

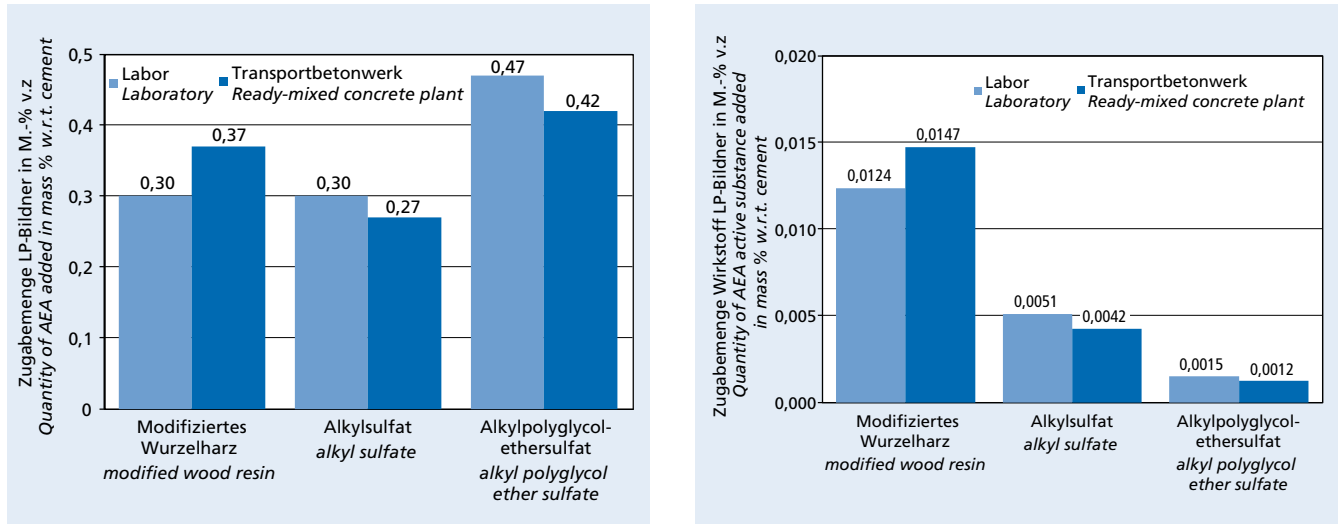


Bild 4: Zugabemenge LP-Bildner (links) bzw. LP-Bildner-Wirkstoff (rechts) im Labor bzw. im Transportbetonwerk zur Erzielung eines Luftgehalts von rund 5 Vol.-%

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. %

16

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 ≤ 0,20 mm, Mikroluftporengehalt ≥ 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	kg/dm ³	N/mm ²	g/m ²
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>	
	30 s	60 s	30 s	60 s	30 s	60 s
Modifiziertes Wurzelharz <i>Modified wood resin</i>	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
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 ± 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 ± 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-

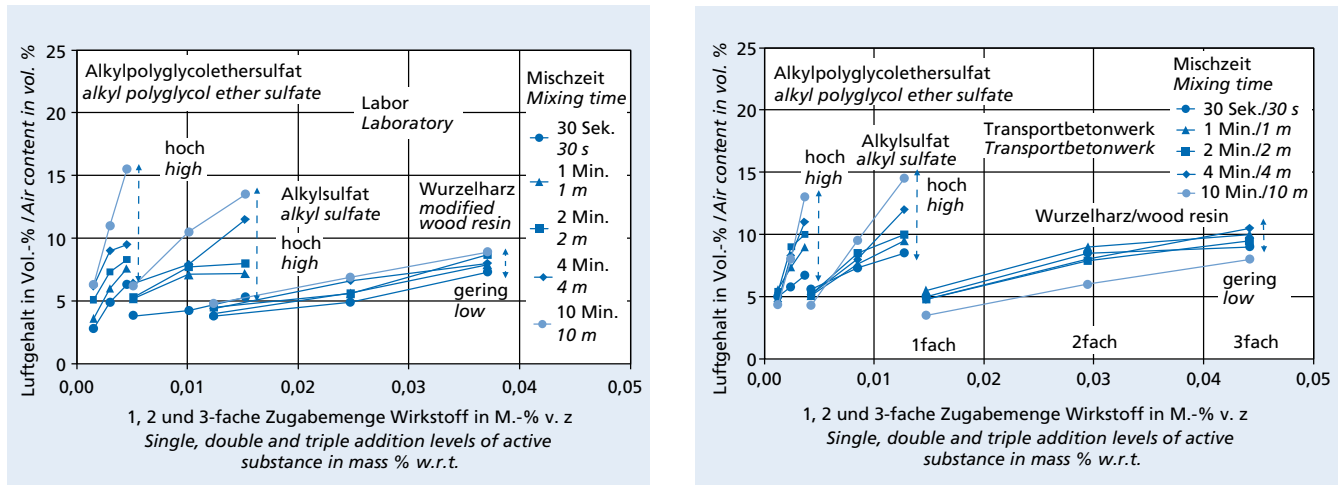


Bild 5: Luftgehalt in Abhängigkeit von der Wirkstoff-Zugabemenge des LP-Bildners und der Mischzeit im Labor (links) bzw. im Transportbetonwerk (rechts) sowie Einstufung des Nachaktivierungspotenzials (gering bzw. hoch)

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)

18

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 Alkylpolyglycoethersulfat auf 13 Vol.-%. Dies war in den Laborversuchen umgekehrt: Alkylsulfat: 13,5 Vol.-% und Alkylpolyglycoethersulfat: 15,5 Vol.-%. Ursache hierfür war vermutlich die höhere Frischbetontemperatur der Praxisversuche, die eine steifere Konsistenz der Betone mit dem LP-Bildner der Wirkstoffbasis Alkylpolyglycoethersulfat 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.