

Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf

Erweiterte Erstprüfung für Luftporenbeton mit Fließmittel unter Berücksichtigung baupraktischer Bedingungen

Extended initial test for air-entrained concrete with superplasticizer under consideration of practical construction conditions

Übersicht

Für die kombinierte Verwendung von Luftporenbildner (LP) und Fließmittel (FM) gibt es bisher keine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung. Durch praxisgerechte Prüfungen im Vorfeld unter Einbeziehung baupraktischer Bedingungen könnten Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden. In einem Forschungsvorhaben wurde daher überprüft, ob die bei LP-Betonen ohne Fließmittel (steife Konsistenz) gefundenen Zusammenhänge zwischen Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auf das Nachaktivierungspotenzial auch bei LP-Betonen mit Fließmittel erhalten bleiben. Dabei wurde u.a. auch der Einfluss der Zugabe-Reihenfolge von LP und FM untersucht. Die Untersuchungen lieferten grundlegende Erkenntnisse zu den Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung bei der kombinierten Verwendung von LP-Bildnern und Fließmitteln bei der Herstellung im Labor und in der Praxis sowie während des Transports. Die Versuche zeigten, dass bisher gängige Vorgehensweisen bei LP-Beton ohne Fließmittel auch für LP-Betone mit Fließmittel einsetzbar und auf Praxisverhältnisse übertragbar sind.

1 Einleitung und Untersuchungsziel

Die Betonbauweise kommt zunehmend auch im innerstädtischen Bereich zur Anwendung, z.B. beim Bau von Kreisverkehren und Busspuren [1]. Der LP-Beton wird im Transportbetonwerk hergestellt, mit Fahrmischern zur Einbaustelle gebracht und dort meist händisch oder mit leichten Einbaugeräten eingebaut. Die für den Einbau erforderliche weichere Konsistenz wird über eine

Abstract

So far there is no recommendation for an extended initial test with the combined use of air-entraining agent and superplasticizer. Practical testing in advance based on realistic construction conditions could provide an early indication of adverse developments. A research project therefore examined whether the correlations between mixing time, active agent and the amount of air-entraining agent added and the potential for later activation found for air-entrained concretes without superplasticizer (stiff consistency) apply to air-entrained concretes with superplasticizer as well. Amongst other things, this involved investigating the influence of the sequence in which the air-entraining agent and superplasticizer are added. The studies yielded fundamental findings relating to the operating mechanisms of air entrainment with the combined use of air-entraining agents and superplasticizers for the production in the laboratory and in practice, as well as during transport. The tests revealed that commonly employed procedures for air-entrained concrete without superplasticizer can also be used for air-entrained concretes with superplasticizer and that they can be applied to practical conditions.

1 Introduction and aim of the investigation

Concrete construction methods are being ever more widely used for urban applications, e.g. for roundabouts and bus lanes [1]. Air-entrained concrete is produced at ready-mixed concrete plants, transported to the spreading site in truck mixers and then generally placed manually or using light placing equipment. The softer consistency required for the placement is set by adding superplasticizer. A combination of air-entraining agents and plasticising concrete admixtures is however also used in other areas of concrete construction, such as in hydraulic engineering for example. Interaction between air-entraining agent and superplasticizer, as well as the fluctuations in water content and temperature encountered in practical construction work, increase the risk of a negative influence on air entrainment and the stability of the fresh concrete [2]. The reasons for this include the later activation of the air-entraining agent in the truck mixer during transportation and a non-uniform sequence of adding air-entraining agent and superplasticizer [3, 4].

The potential for later activation can be estimated as part of an extended initial test [3-5]. This involves performing an additional test (Fig. 1), in which the added amount of air-entraining agent established in the initial test is doubled and the air content of the mixtures with the two added amounts is determined after a short mixing time of 30 seconds and after an extended mixing time of around four to six minutes. In the event of a significant increase in air content with the double added amount and extended mixing time, there is a risk of a subsequent rise in the air content on execution of the building work. Systematic studies performed on

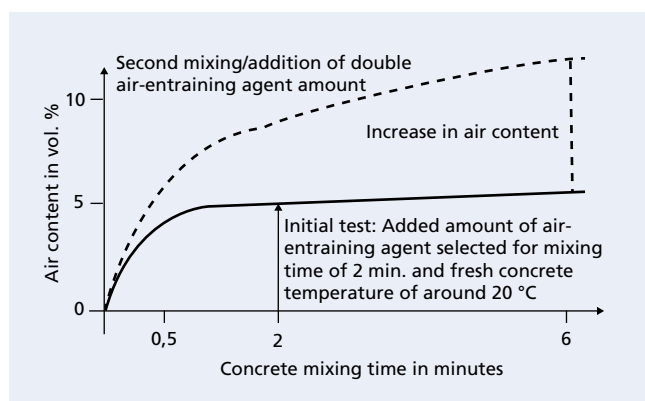


Bild 1: Prüfung des Nachaktivierungspotenzials einer Betonzusammensetzung bei der Erstprüfung im Labor [3]

Figure 1: Testing of potential for later activation of a concrete composition in initial test in the laboratory [3]

Fließmittelzugabe eingestellt. Aber auch in anderen Bereichen des Betonbaus erfolgt eine kombinierte Verwendung von LP-Bildnern und verflüssigenden Betonzusatzmitteln, beispielsweise im Wasserbau. Wechselwirkungen zwischen Luftporenbildner und Fließmittel sowie baupraktische Schwankungen von Wassergehalt und Temperatur erhöhen das Risiko, dass Luftporenbildung und Stabilität des Frischbetons beeinträchtigt werden [2]. Ursachen sind u.a. die nachträgliche Aktivierung des LP-Bildners im Fahrmischer während des Transports oder eine nicht einheitliche Zugabe-Reihenfolge von LP und FM [3, 4].

Das Nachaktivierungspotenzial kann im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung abgeschätzt werden [3–5]. Dabei wird in einem Zusatzversuch (Bild 1) die in der Erstprüfung ermittelte LP-Bildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden Zugabemengen nach einer kurzen Mischzeit von 30 Sekunden und nach einer verlängerten Mischzeit von rd. vier bis sechs Minuten bestimmt. Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischzeit besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts. Systematische Untersuchungen an steifen Straßenbetonen ohne Fließmitteleinsatz zeigten, dass das Nachaktivierungspotenzial von LP-Bildnern mit natürlicher Wirkstoffbasis als gering zu bewerten ist [3, 6]. Ursache hierfür ist, dass der größte Anteil des Wirkstoffs in der Porenlösung ausfällt.

Eine deutlichere nachträgliche Erhöhung des Luftgehalts ist bei synthetischen Tensiden zu erwarten. Für die kombinierte Verwendung von LP und FM gab es bisher keine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung. In dem Forschungsvorhaben sollte in Labor- und Praxisversuchen nunmehr überprüft werden, ob die bei LP-Betonen ohne Fließmittel (steife Konsistenz) gefundenen Zusammenhänge zwischen Mischzeit, Wirkstoffbasis und Zugabemenge des LP-Bildners auf das Nachaktivierungspotenzial auch bei LP-Betonen mit Fließmittel erhalten bleiben. Dabei wurde insbesondere der Einfluss der Zugabe-Reihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel untersucht.

Als Ergebnis der Versuche sollte eine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung erarbeitet werden, um die Luftporenbildung und das Nachaktivierungspotenzial von LP-Beton beim Einsatz von Fließmittel abzuschätzen.

2 Umfang der Untersuchungen

Die Entwicklung der Prüfvorschrift für Laborversuche und die Feststellung der Übertragbarkeit der Vorgehensweise auf baupraktische Verhältnisse erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die Erfahrungen der Hersteller von LP-Beton (Baufirmen und Transportbetonwerke) mit einem Fragebogen erfasst und typische

stiff paving concretes without the use of superplasticizer revealed that air-entraining agents with a natural active agent exhibit little potential for later activation [3, 6]. This is due to the fact that the majority of the active agent precipitates in the pore solution.

A considerable later increase in air content is to be expected with synthetic tensides. Until now there has not been any recommendation for an extended initial test with the combined use of air-entraining agent and superplasticizer. The aim of the research project is to conduct laboratory and practical tests to examine whether the correlations between mixing time, active agent and the amount of air-entraining agent added and the potential for later activation found for air-entrained concretes without superplasticizer (stiff consistency) apply to air-entrained concretes with superplasticizer as well. In particular, the influence of the sequence of adding air-entraining agent and superplasticizer was studied. The intention was to take the results of the tests as a basis for drawing up a recommendation for an extended initial test to permit estimation of the air entrainment and potential for later activation of air-entrained concrete with the use of superplasticizers.

2 Scope of the studies

Development of the test specification for laboratory experiments and establishment of the transferability of the procedure to practical construction conditions took place in several stages. The first step involved conducting a survey among producers of air-entrained concrete (building companies and ready-mixed concrete plants) by way of a questionnaire and selecting typical air-entraining agent/superplasticizer admixture combinations for the laboratory and practical tests. Air entrainment was then investigated in the fresh and hardened concrete in laboratory experiments. Practical tests were subsequently performed at the ready-mixed concrete plant. Comparison of the test results permitted conclusions to be drawn about the transferability of laboratory experiments to practical construction conditions. Finally, a recommendation was drawn up for an extended initial test with the combined use of air-entraining agent and superplasticizer with the aim of ensuring the required air entrainment in practice.

3 Testing procedure

3.1 Survey among producers of air-entrained concrete

Experience gained by the producers of air-entrained concrete was gathered in a questionnaire. The survey was conducted among seven building companies and twelve manufacturers of ready-mixed concrete. Particular emphasis was placed on the questions of how, and in which order, the admixtures (air-entraining agent/superplasticizer) and water are added. A distinction was made in this

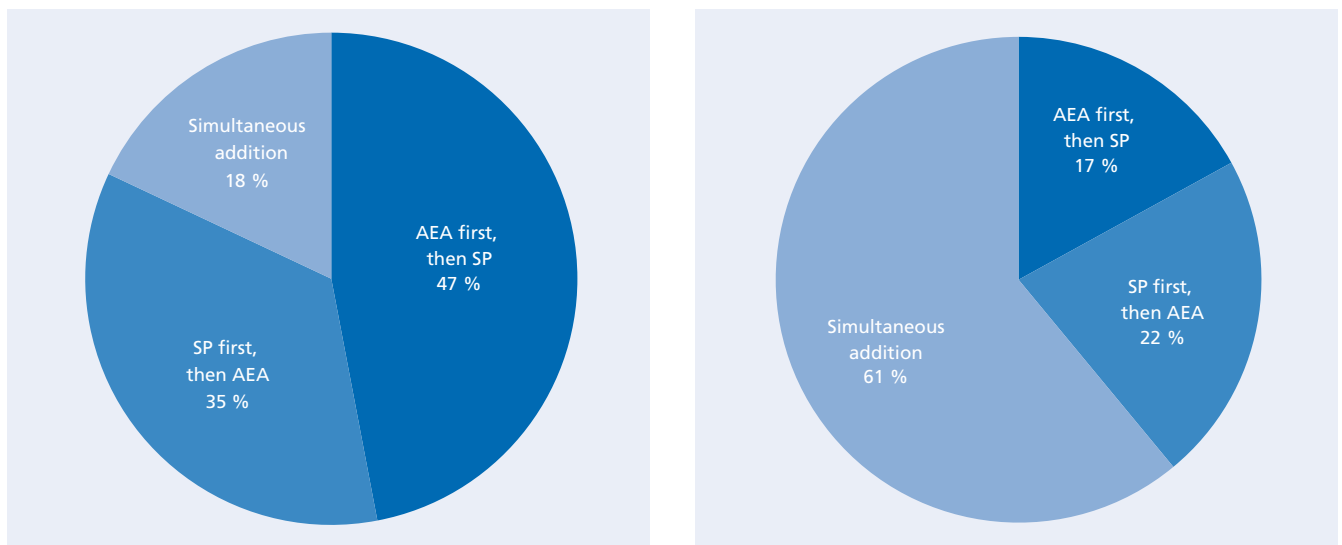


Bild 2: Zugabe-Reihenfolge der Zusatzmittel LP/FM in der Erstprüfung (links) und in der Praxis (rechts)
Figure 2: Addition sequence of AEA/SP admixtures in initial test (left) and in practice (right)

Tabelle 1: Zugabe-Reihenfolgen der Zusatzmittel LP und FM für die Laborversuche

Table 1: Addition sequences of air-entraining agent and superplasticizer admixtures for the laboratory experiments

AEA/SP are added simultaneously	AEA first, then SP	SP first, then AEA
Addition of 1/3 water, mixing for 30 seconds	Addition of AEA to 2/3 water, mixing for 60 seconds	Addition of 2/3 water to concrete, then SP to concrete
Addition of AEA and SP mixed with 1/3 water, then	Addition of SP to concrete, then	Mixing for 30 seconds, addition of AEA to concrete, then
90 seconds wet mixing time with all methods		

Zusatzmittelkombinationen LP/FM für die Labor- und Praxisversuche ausgewählt. Anschließend wurde in Laborversuchen die Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton untersucht. Danach wurden Praxisversuche im Transportbetonwerk durchgeführt. Der Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglichte eine Aussage zur Übertragbarkeit von Laborversuchen auf baupraktische Verhältnisse. Als Ergebnis wurde eine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung bei der kombinierten Verwendung von LP und FM erarbeitet, die eine zielgerechte Luftporenbildung in der Praxis sicherstellen sollen.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Befragung der Hersteller von LP-Beton

Die Erfahrungen der Hersteller von LP-Beton wurden in einer Fragebogenaktion erfasst. Befragt wurden sieben bauausführende Firmen und zwölf Transportbetonhersteller. Es wurde insbesondere erfragt, wie und in welcher Reihenfolge die Zusatzmittel (LP/FM) und das Zugabewasser zugegeben werden. Dabei wurde unterschieden zwischen der Erstprüfung im Labor und der Verfahrensweise im Mischwerk. Die Fragebogen wurden im VDZ ausgewertet und typische Zugabe-Reihenfolgen ermittelt. Auf der Basis der bei der Forschungsstelle vorliegenden Erfahrungen, den Informationen der Zusatzmittelhersteller und der Befragung wurden Zusatzmittel (zwei LP-Bildner und zwei Fließmittel) und Zusatzmittelkombinationen ausgewählt. Es wurden zwei LP-Bildner (keine Konzentrate) mit natürlicher (mod. Wurzelharz) bzw. synthetischer Wirkstoffbasis (Alkylsulfat) mit geringem bzw. hohem Nachaktivierungspotenzial und zwei Fließmittel (Polycarboxylatether – PCE – aus dem Bereich Transportbeton und Kombinationsprodukt aus Naphthalinsulfonat/Melaminsulfonat) eines Herstellers in folgenden Kombinationen FM/LP in den Labor- und Praxisversuchen eingesetzt:

- PCE/synthetisches Tensid
- PCE/modifiziertes Wurzelharz
- Kombinationsprodukt/modifiziertes Wurzelharz
- Kombinationsprodukt/synthetisches Tensid.

Für alle Zusatzmittelkombinationen lag eine Wirksamkeitsprüfung des Herstellers vor.

Die Befragung zur Zugabe-Reihenfolge LP-Bildner und Fließmittel zum Zeitpunkt der Erstprüfung im Labor zeigte folgendes Ergebnis: Bei der Erstprüfung wurde in 47 % der Fälle zuerst der LP-Bildner und danach das Fließmittel zugegeben (Bild 2). Auf die umgekehrte Variante entfielen 35 %. Die Variante „LP und FM gleichzeitig“ nannten 18 % der Befragten. Bei der Herstellung in der Mischanlage entfielen 61 % der Antworten auf die gleichzeitige Zugabe von LP und FM. In 17 % der Fälle wurde zuerst der LP-Bildner und danach das Fließmittel und in 22 % zuerst das Fließmittel und danach der LP-Bildner zugegeben. Damit zeigte sich in der Praxis eine andere Zugabe-Reihenfolge als in der Erstprüfung. Es fand eine Verlagerung der Hauptantwortgruppe „erst LP, dann FM“ (Erstprüfung) zur „gleichzeitigen Zugabe von LP und FM“ bei der Praxisanwendung statt. Grund hierfür dürfte die damit verbundene kürzere Mischzeit sein, die einen höheren Durchsatz der Mischanlage erlaubt. Für die Laborversuche (Tabelle 1) und die

regard between the initial test in the laboratory and the procedure at the mixing plant. The questionnaires were evaluated at VDZ and typical addition sequences were determined. Admixtures (two air-entraining agents and two superplasticizers) and admixture combinations were selected on the basis of the knowledge available to the research centre, information provided by the admixture manufacturers and the results of the survey. Two air-entraining agents (not concentrates) with natural (mod. wood resin) and synthetic (alkyl sulphate) active agent with low and high potential for later activation, and two superplasticizers (polycarboxylate ether – PCE – as used in ready-mixed concrete and a combined product made of naphthalene sulfonate/melamine sulfonate) from one producer were used in the following superplasticizer/air-entraining agent combinations in the laboratory and practical tests:

- PCE/synthetic tenside
- PCE/modified wood resin
- Combined product/modified wood resin
- Combined product/synthetic tenside

Effectiveness studies were available from the producers for all admixture combinations.

The questionnaire relating to the sequence of adding the air-entraining agent and superplasticizer at the time of the initial test in the laboratory yielded the following results: In 47 % of cases, the air-entraining agent was added first in the initial test and then the superplasticizer (Fig. 2). The reverse applied in 35 % of cases. 18 % of those asked mentioned the alternative „Simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer“. In the case of production at the mixing plant, 61 % of the answers stated the simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer. In 17 % of cases the air-entraining agent was added first, and then the superplasticizer, whereas in 22 % of cases the superplasticizer was added first and then the air-entraining agent. This showed that the sequence of addition is different in practice than in the initial test. The main group of answers shifted from „Air-entraining agent first, then superplasticizer“ (initial test) to „Simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer“ in practice. This is probably due to the associated shorter mixing time, permitting a higher mixing plant throughput. Three sequences were selected for the laboratory experiments (Table 1) and the practical tests (s. Section 3.3.2).

3.2 Laboratory experiments

3.2.1 Mixture composition

The laboratory experiments were conducted with the road pavement cement CEM I 42,5 N used at the ready-mixed concrete plant with a cement content of 350 kg/m³ and a w/c ratio of 0.44. The tap water available at the research centre was used for the production of the concretes. The aggregate mixture consisted of Rhine gravel 0/16 mm with a grading curve in the middle of the grading curve range A/B 16 in accordance with DIN 1045-2. The aggregate content was 1780 kg/m³. To determine the influence of changes in actual construction practice on air entrainment, orientation experiments were performed in which the water content was varied by ± 5 l/m³ and the standard fresh concrete temperature of around 20 °C by ± 10 °C with constant admixture dosing. The

Praxisversuche (s. Abschnitt 3.3.2) wurden drei Reihenfolgen ausgewählt.

3.2 Laborversuche

3.2.1 Mischungszusammensetzung

Die Laborversuche wurden mit dem im Transportbetonwerk verwendeten Fahrbahndeckenzement CEM I 42,5 N mit einem Zementgehalt von 350 kg/m³ und einem w/z-Wert von 0,44 durchgeführt. Für die Herstellung der Betone wurde das in der Forschungsstelle vorhandene Leitungswasser verwendet. Das Gesteinskörnungsgemisch bestand aus Rheinkiesand 0/16 mm mit einer Sieblinie in der Mitte des Sieblinienbereichs A/B 16 nach DIN 1045-2. Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug 1780 kg/m³. Um den Einfluss baupraktischer Veränderungen auf die Luftporenbildung zu erfassen, wurden in orientierenden Versuchen der Wassergehalt um ± 5 l/m³ und die Standardfrischbetontemperatur von rd. 20 °C um ± 10 °C bei gleichbleibender Zusatzmitteldosierung variiert. Folgende Zusatzmittelkombinationen FM/LP wurden für die Laborversuche gewählt:

- PCE/synthetisches Tensid
- PCE/mod. Wurzelharz
- Kombinationsprodukt/mod. Wurzelharz

Zur Anknüpfung an den bisherigen Erfahrungshintergrund wurde mit der o.g. Betonzusammensetzung jeweils ein LP-Beton mit dem Wurzelharz und dem synthetischen Tensid ohne Fließmittel hergestellt.

3.2.2 Herstellung der Betone

Von jedem Beton wurden 150 l Frischbeton in einem 250-l-Zwangsmischer hergestellt. Es wurden oberflächentrockene Gesteinskörnungen verwendet. Bei der Herstellung der Betone wurde folgendes Mischregime eingehalten:

- grobe Gesteinskörnung in den Mischer
- feine Gesteinskörnung in den Mischer
- 30 Sekunden trocken mischen
- Vorfeuchten durch Zugabe von einem Drittel des Zugabewassers in den laufenden Mischer
- 30 Sekunden mischen
- 5 Minuten Saugzeit
- 30 Sekunden mischen
- Zement in den Mischer geben
- 30 Sekunden mischen

Danach begannen die aufgrund der Befragung festgelegten drei Zugabe-Reihenfolgen (s. Tabelle 1): gleichzeitige Zugabe LP und FM, erst LP, dann FM und erst FM, dann LP. Der Wassergehalt der Zusatzmittel wurde vom Zugabewasser abgezogen, wobei der Feststoffgehalt der Zusatzmittel vernachlässigt wurde.

Bei allen drei Varianten betrug die Nassmischzeit 90 Sekunden. Die Zugabemenge der Zusatzmittel wurde in Abhängigkeit der Zugabe-Reihenfolge und der Kombination LP/FM so eingestellt, dass die Frischbetone 45 Minuten nach Ende der Nassmischzeit einen Luftgehalt von $(5,5 \pm 0,5)$ Vol.-% und ein Ausbreitmaß von 40 cm bis 45 cm aufwiesen. Bei Einhaltung der gewünschten Frischbetonkennwerte wurden 45 Minuten nach Mischende vier Würfel (Kantenlänge 15 cm) für die Festbetonprüfungen hergestellt.

a) Frischbetonuntersuchungen

Sofort sowie 10 Minuten und 45 Minuten nach der Herstellung (Mischende) wurden Luftgehalt und Rohdichte mit dem 8-l-Drucktopf sowie die Konsistenz mit dem Ausbreitmaß bestimmt. Vor den Prüfzeitpunkten nach 10 Minuten bzw. 45 Minuten wurde der Frischbeton noch einmal 30 Sekunden gemischt. Der LP-Topf wurde auf dem Rütteltisch verdichtet.

b) Festbetonuntersuchungen

45 Minuten nach Mischende wurden für die Prüfungen am Festbeton Probekörper in Stahlformen hergestellt. Die Probekörper wurden auf dem Rütteltisch verdichtet. Von jedem Beton wurden drei Würfel (150 mm Kantenlänge) zur Bestimmung der 28-Tage-

following superplasticizer/air-entraining agent admixture combinations were selected for the laboratory experiments:

- PCE/synthetic tenside
- PCE/mod. wood resin
- Combined product/mod. wood resin

Against the background of the knowledge already gained, one air-entrained concrete each was made with the above-mentioned composition using the wood resin and the synthetic tenside with-out superplasticizer.

3.2.2 Production of the concretes

150 l of fresh concrete of each type was produced in a 250 l compulsory mixer. Surface dry aggregates were used. The following mixing scheme was employed for the production of the concretes:

- Feeding of coarse aggregate into the mixer
- Feeding of fine aggregate into the mixer
- Dry mixing for 30 seconds
- Pre-moistening by adding one third of the water with the mixer in operation
- Mixing for 30 seconds
- 5 minutes suction time
- Mixing for 30 seconds
- Feeding of cement into the mixer
- Mixing for 30 seconds

The three addition sequences (s. Table 1) determined on the basis of the survey were then implemented: simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer, air-entraining agent first, then superplasticizer, and superplasticizer first, then air-entraining agent. The water content of the admixtures was subtracted from the water added and the solid content of the admixtures was ignored. The wet mixing time for all three alternatives was 90 seconds. The amounts of admixture added were set on the basis of the addition sequence and the air-entraining agent/superplasticizer combination in such a way that, 45 minutes after completion of the wet mixing time, the fresh concretes exhibited an air content of (5.5 ± 0.5) vol. % and a flow table spread of 40 cm to 45 cm. Given compliance with the desired fresh concrete characteristic values, four cubes (edge length 15 cm) were produced for the hardened concrete tests 45 minutes after completion of the mixing process.

a) Fresh concrete tests

Immediately, as well as 10 minutes and 45 minutes after production (end of mixing), the air content and bulk density were determined with an 8 l pressure vessel, as well as the consistency by way of the flow table spread. The fresh concrete was mixed again for 30 seconds before being tested after 10 minutes and 45 minutes. The air void vessel was compacted on the vibrating table.

b) Hardened concrete tests

45 minutes after the end of mixing, test specimens were produced in steel moulds for the hardened concrete tests. The test specimens were compacted on the vibrating table. Three cubes (150 mm edge length) were made from each concrete to determine the 28-day compressive strength and one cube (150 mm edge length) to determine the air void characteristic values of the hardened concrete.

A total of nine concretes were produced with superplasticizer (three addition sequences, three air-entraining agent/superplasticizer combinations), as well as two concretes of stiff consistency without superplasticizer.

3.2.3 Storage and testing

a) Fresh concrete

The temperature, bulk density and air content of the fresh concrete were determined by means of pressure methods in an 8 l air void vessel. Consistency was determined by way of the flow table spread. The tests were performed in accordance with the DIN EN 12350 series of standards.

Druckfestigkeit und ein Würfel (150 mm Kantenlänge) zur Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton hergestellt.

Insgesamt wurden neun Betone mit Fließmittel FM (drei Zugabe-Reihenfolgen, drei Kombinationen LP/FM) und zwei Betone steifer Konsistenz ohne Fließmittel hergestellt.

3.2.3 Lagerung und Prüfung

a) Frischbeton

Am Frischbeton wurden die Temperatur und die Rohdichte sowie der Luftgehalt mittels Druckausgleichsverfahren im 8-l-Luftporentopf bestimmt. Die Konsistenzermittlung erfolgte mit dem Ausbreitmaß. 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 ($20 \pm 2,0$) °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von (65 ± 5) Vol.-% 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 (150 mm Kantenlänge) 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 ($20 \pm 2,0$) °C und einer rel. Luftfeuchtigkeit von (65 ± 5) Vol.-% gelagert.

Luftporenkennwerte

Der für die Bestimmung der Luftporenkennwerte vorgesehene Würfel (150 mm Kantenlänge) 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 Bestimmung der LP-Kennwerte gemäß DIN EN 480-11 entnommen wurden.

3.2.4 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit

Die mischzeitabhängige Luftporenbildung im Frischbeton wurde mit beiden LP-Bildnern und der im Vorversuch bestimmten

b) Hardened concrete

After production, the test specimens were covered with damp cloths and stored in their moulds for (24 ± 1) hours in a climatic chamber at an air temperature of ($20 \pm 2,0$) °C and a relative humidity of (65 ± 5) %. Afterwards, the test specimens were removed from the formwork. The test specimens were then stored and tested as follows:

Compressive strength

Following removal of the formwork, three cubes (150 mm edge length) were stored in water in accordance with DIN EN 12390-2:2001-06 up to an age of seven days and then stored in a climatic chamber at an air temperature of ($20 \pm 2,0$) °C and a relative humidity of (65 ± 5) % until the time of 28-day compressive strength testing in accordance with DIN EN 12390-3.

Air void characteristic values

The cube (150 mm edge length) intended for determination of the air void characteristic values was stored, following removal of the formwork, in water up to an age of 7 days and then stored in a climatic chamber until the time at which two slices were taken from the cube for the determination of the air void characteristic values in accordance with DIN EN 480-11.

3.2.4 Air entrainment as a function of mixing time

The air entrainment in fresh concrete as a function of mixing time was established with the two air-entraining agents and employing both the „single“ added amount determined in the preliminary trial and the double added amount of air-entraining agent. The amount of superplasticizer added was kept constant. The amounts of admixtures added were subtracted from the water added. Air-entraining agents and superplasticizers were added in accordance with the specified mixing scheme (s. Section 3.2.2). The wet mixing time commenced following the addition of all constituents. After mixing the concrete for 30 seconds, the mixer was briefly halted, concrete was removed for testing the air content with the pressure vessel and the air content was determined directly. Immediately after removal of the concrete from the mixer, the remaining concrete was further mixed and the air content was tested again after 60 seconds and 90 seconds, as well as after 2 minutes, 4 minutes, 7 minutes, 10 minutes and 15 minutes. The procedure employed to test the air content was as described in Section 3.2.3.

To establish the influence of practical construction conditions, air entrainment as a function of mixing time was also determined at fresh concrete temperatures of around 10 °C and 30 °C as well as with water contents of ± 5 l/m³ (standard parameters: 20 °C and 154 l/m³).

3.3 Practical tests at ready-mixed concrete plant

3.3.1 General

The practical tests were conducted at the ready-mixed concrete plant of the Dyckerhoff GmbH in Neuss. The mixing plant was equipped with a 2 m³ mixer (pan mixer) and silos for the cement and 0/2 mm, 2/8 mm and 8/16 mm aggregates. To ensure the reproducibility of the test series, the same concrete compositions were chosen for laboratory and practical tests (cement and water content, grading curve, s. Section 3.2.1). The cement and admixtures were taken from comparable batches. The aggregates used in the laboratory and in Neuss originated from different deposits.

3.3.2 Production of the concretes

Based on a quantity of 1 m³ of fresh concrete, aggregates and cement were taken from the silos, weighed and fed into the mixer. The water was then added to the mixer. The quantity corresponded to the total water content (154 kg/m³, w/c = 0.44), reduced by the inherent moisture of the aggregate mixture and the water content of the admixtures. The inherent moisture of the aggregates was determined every morning before the start of the experimental programme. The quantities of admixtures were weighed on the basis of 1 m³ of fresh concrete and directly fed into the mixer or the drum of the ready-mixed concrete lorry depending on the type

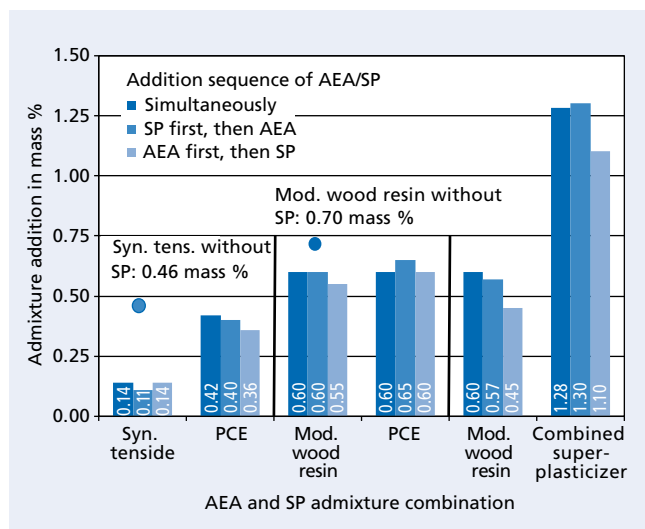


Bild 3: Zugabemengen an Zusatzmittel (jeweils links LP-Bildner, rechts Fließmittel) in Abhängigkeit von der Zusatzmittel-Kombination (syn. Tensid/PCE, mod. Wurzelharz/PCE und mod. Wurzelharz/Kombinationsmittel) und der Zugabe-Reihenfolge LP/FM
Figure 3: Added amounts of admixtures (always air-entraining agent on the left, superplasticizer on the right) as a function of admixture combination (syn. tenside/PCE, mod. wood resin/PCE and mod. wood resin/combined agent) and air-entraining agent/superplasticizer addition sequence

„einfachen“ sowie einer demgegenüber verdoppelten LP-Bildner-Zugabemenge bestimmt. Die Zugabemenge an Fließmittel wurde konstant gehalten. Die Zugabemenge der Zusatzmittel wurde vom Zugabewasser abgezogen. LP-Bildner und Fließmittel wurden entsprechend dem vorgegebenen Mischregime (s. Abschnitt 3.2.2) zugegeben. Nach Zugabe aller Bestandteile begann die Nassmischzeit. Der Beton wurde 30 Sekunden gemischt, anschließend wurde der Mischer kurz angehalten, Beton für die Prüfung des Luftgehalts mit dem Drucktopf entnommen und unmittelbar der Luftgehalt bestimmt. Sofort nach der Entnahme des Betons aus dem Mischer wurde der verbleibende Beton weiter gemischt und die Prüfung des Luftgehalts nach 60 Sekunden und 90 Sekunden sowie 2 Minuten, 4 Minuten, 7 Minuten, 10 Minuten und 15 Minuten wiederholt. Die Prüfung des Luftgehalts entsprach der in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Vorgehensweise.

Um den Einfluss baupraktischer Bedingungen zu ermitteln, wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung auch mit Frischbetontemperaturen von rd. 10 °C bzw. 30 °C und mit Wassergehalten von $\pm 5 \text{ l/m}^3$ (Standardvarianten: 20 °C bzw. 154 l/m³) ermittelt.

of test concerned. The test procedure was tried out in preliminary trials and the added amounts of admixtures were specified. The aim was to obtain the following fresh concrete characteristic values 60 minutes after completion of charging:

- Flow table spread 40 cm to 45 cm
- Air content (5.5 ± 0.5) vol. %

(single added amount of air-entraining agent)

Concretes with a shorter mixing time and double added amount of air-entraining agent were incorporated to examine the potential for later activation. A total of twelve concretes with different parameters (mixing time, admixture combination, addition sequence) were produced.

a) Subsequent addition of superplasticizer into truck mixer
With four concretes, the subsequent addition of superplasticizer (combined agent) was simulated on the construction site (direct addition into truck mixer with drum revolving at high speed half an hour after completion of charging):

- Addition of air-entraining agent (syn. tenside or wood resin) into compulsory mixer
- Long mixing time 90 seconds/addition of single amount of air-entraining agent

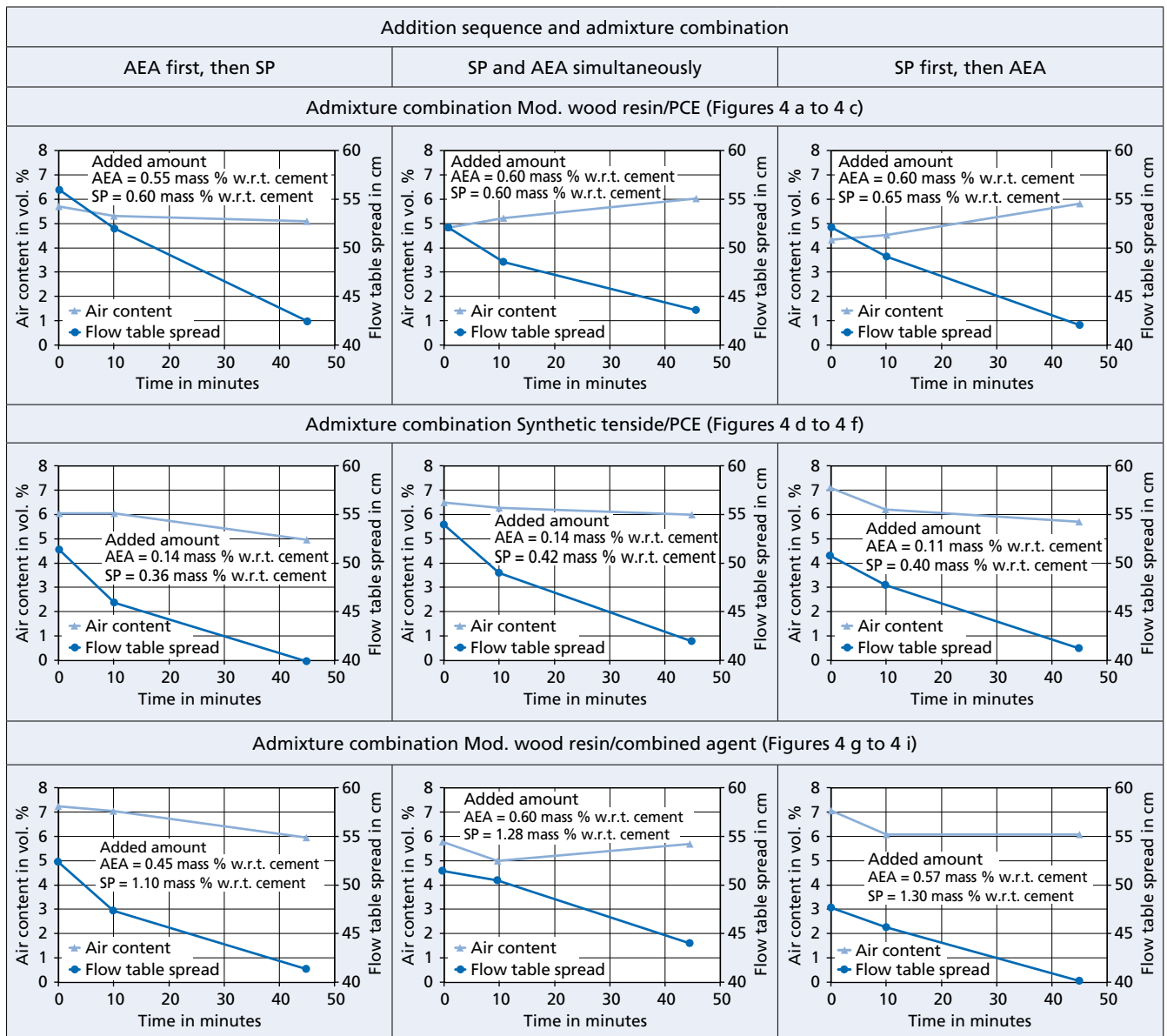


Bild 4 a bis i: Ausbreitmaß und Luftgehalt in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination, der Zugabe-Reihenfolge und der Zeit
Figures 4 a to i: Flow table spread and air content as a function of admixture combination, addition sequence and time

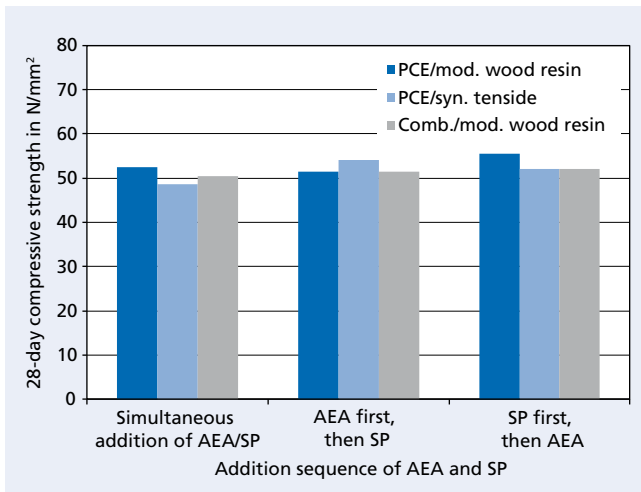


Bild 5: 28-Tage-Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination und der Zugabe-Reihenfolge der Zusatzmittel
Figure 5: 28-day compressive strength as a function of admixture combination and addition sequence of admixtures

3.3 Praxisversuche im Transportbetonwerk

3.3.1 Allgemeines

Die Praxisversuche fanden im Transportbetonwerk der Dyckerhoff GmbH in Neuss statt. Die Mischanlage war mit einem 2-m³-Mischer (Tellermischer) und Silos für den Zement und die Gesteinskörnungen 0/2 mm, 2/8 mm und 8/16 mm ausgestattet. Um die Vergleichbarkeit der Versuchsreihen sicherzustellen, wurden für Labor- und Praxisversuche gleiche Betonzusammensetzungen (Zement- und Wassergehalt, Sieblinie, s. Abschnitt 3.2.1) gewählt. Zement und Zusatzmittel entstammten aus vergleichbaren Lieferchargen. Die im Labor und in Neuss verwendeten Gesteinskörnungen wurden aus unterschiedlichen Vorkommen geliefert.

3.3.2 Herstellung der Betone

Bezogen auf eine Menge von 1 m³ Frischbeton wurden Gesteinskörnungen und Zement aus den Silos abgezogen und abgewogen in den Mischer gegeben. Danach wurde das Zugabewasser in den Mischer gegeben. Die Menge entsprach dem Gesamtwassergehalt (154 kg/m³, w/z = 0,44), vermindert um die Eigenfeuchte des Gesteinskörnungsgemisches und den Wassergehalt der Zusatzmittel. Die Eigenfeuchte der Gesteinskörnungen wurde täglich morgens vor Beginn des Versuchsprogramms ermittelt. Die Zusatzmittel wurden bezogen auf 1 m³ Frischbeton abgewogen und je nach Versuchsvariante direkt in den Mischer bzw. in die Trommel des Mischfahrzeugs gegeben. In Vorversuchen wurde der Versuchsablauf erprobt und die Zugabemengen der Zusatzmittel festgelegt. Folgende Frischbetonkennwerte wurden 60 Minuten nach Beladung angestrebt:

- Ausbreitmaß 40 cm bis 45 cm
- Luftgehalt (5,5 ± 0,5) Vol.-%
(einfache Zugabemenge LP-Bildner)

Zur Überprüfung des Nachaktivierungspotenzials wurden Betone mit verkürzter Mischzeit und doppelter Zugabemenge an LP-Bildner einbezogen. Insgesamt wurden zwölf Betone mit unterschiedlichen Varianten (Mischzeit, Zusatzmittelkombination, Zugabe-Reihenfolge) hergestellt.

a) Nachträgliche Zugabe FM in den Fahrmischer

Bei vier Betonen wurde die nachträgliche Zugabe von FM (Kombinationsmittel) auf der Baustelle simuliert (Zugabe eine halbe Stunde nach Beladungsende direkt in den Fahrmischer bei schnell drehender Trommel):

- Zugabe LP (syn. Tensid bzw. Wurzelharz) in den Zwangsmischer
- lange Mischzeit 90 Sekunden/einfache Zugabe LP-Bildner
- kurze Mischzeit 45 Sekunden/doppelte Zugabe LP-Bildner

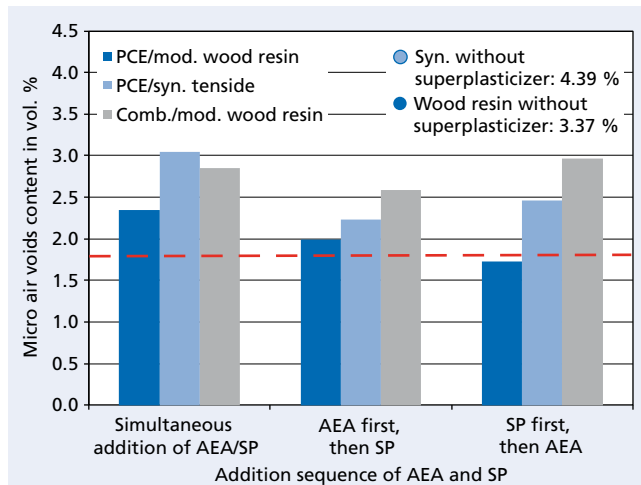


Bild 6: Mikroluftporengehalt in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination und der Zugabe-Reihenfolge
Figure 6: Micro air voids content as a function of admixture combination and addition sequence

- Short mixing time 45 seconds/addition of double amount of air-entraining agent
- Addition of superplasticizer (combined agent) into truck mixer with drum revolving at high speed after transportation simulation for 30 minutes

b) Addition of air-entraining agent and superplasticizer into compulsory mixer

Eight concretes were produced with direct addition of air-entraining agent (syn. tenside or wood resin) and superplasticizer (PCE) into the compulsory mixer:

- Simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer to concrete: mixing time 90 seconds
- Simultaneous addition of air-entraining agent and superplasticizer to concrete: Mixing time 45 seconds/double amount of air-entraining agent
- First, addition of air-entraining agent and mixing time 30 seconds, then addition of superplasticizer to concrete and mixing time 60 seconds
- First, addition of air-entraining agent and mixing time 15 seconds, then addition of superplasticizer to concrete and mixing time 30 seconds/double amount of air-entraining agent

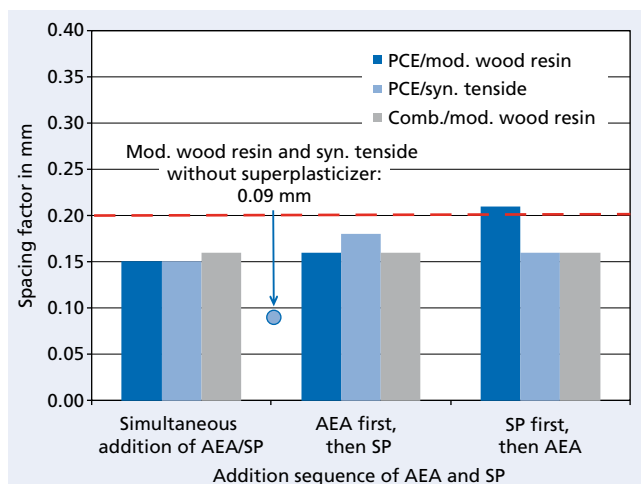


Bild 7: Abstands faktor in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination und der Zugabe-Reihenfolge

Figure 7: Spacing factor as a function of admixture combination and addition sequence

- Zugabe FM (Kombinationsmittel) nach 30 Minuten Transportsimulation in den Fahrmischer bei schnell drehender Trommel

b) Zugabe von LP und FM in den Zwangsmischer
Acht Betone wurden hergestellt, bei denen LP-Bildner (syn. Tensid bzw. Wurzelharz) und Fließmittel (PCE) direkt in den Zwangsmischer zugegeben wurden:

- gleichzeitige Zugabe LP + FM in den Beton:
90 Sekunden Mischzeit
- gleichzeitige Zugabe LP + FM in den Beton:
45 Sekunden Mischzeit/doppelte Menge LP
- erst Zugabe LP und 30 Sekunden Mischzeit,
dann FM in den Beton und 60 Sekunden Mischzeit
- erst Zugabe LP und 15 Sekunden Mischzeit, dann FM in den Beton und 30 Sekunden Mischzeit/doppelte Menge LP

Nach Herstellung der ersten Charge wurden in einem Labor direkt an der Mischanlage Ausbreitmaß und Luftgehalt des Frischbetons bestimmt. Gegebenenfalls wurden die Zusatzmitteldosierungen angepasst. Anschließend wurden die nächsten zwei Chargen hergestellt. Von jedem der zwölf Betone wurden drei 1-m³-Chargen in das Mischfahrzeug gefüllt. Nach dem Befüllen der dritten Charge (Beladungsende) begann der Versuchszeitraum für die Transportsimulation. Hierzu fuhr der Fahrmischer zum stationären Betonlabor des Mischwerks. Während des Versuchszeitraums stand der Fahrmischer mit laufendem Motor auf dem Freigelände vor dem Labor. Die Drehzahl der Trommel wurde auf

After production of the first batch, the flow table spread and air content of the fresh concrete were determined in a laboratory directly at the mixing plant. The admixture dosage was adjusted if necessary. The next two batches were then produced. Three 1 m³ batches of each of the twelve concretes were poured into the ready-mixed concrete lorry. The transportation simulation test time began after filling with the third batch (end of charging). For this purpose, the truck mixer was driven to the stationary concrete laboratory of the mixing plant. During the test period, the truck mixer was left standing with its engine running on the forecourt of the laboratory. The speed of the drum was set to around four revolutions per minute (simulation of „Driving with drum revolving at low speed“). The transportation process was simulated over a period of 60 minutes.

The air content and flow table spread of the fresh concrete were determined immediately upon completion of charging, as well as 10 minutes, 30 minutes, 45 minutes and 60 minutes after the end of charging. In addition to the fresh concrete tests, one test specimen each (15 cm cube) was produced 10 minutes, 30 minutes and 60 minutes after the end of charging for the determination of the air void characteristic values of the hardened concrete. A further cube was produced 45 minutes after the end of charging for the „addition of superplasticizer into truck mixer“ test case. In addition, three test specimens (15 cm cube) were produced 60 minutes after the end of charging for testing the 28-day compressive strength. The test specimens for the hardened concrete tests and the air void

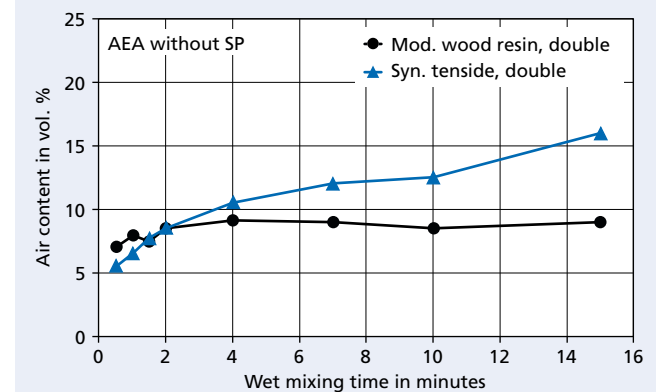
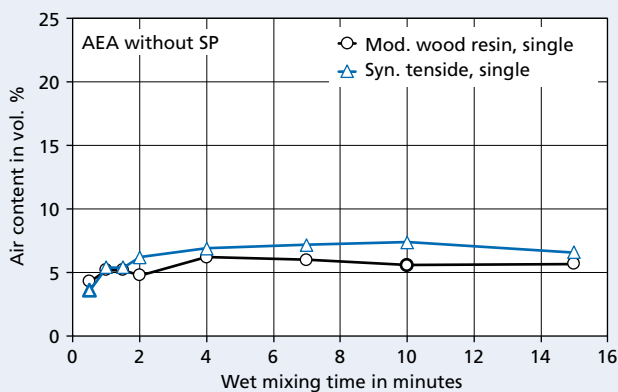


Bild 8 a und b: Mischzeitabhängige Luftporenbildung von LP-Beton ohne Fließmittel in Abhängigkeit von dem LP-Bildner: links einfache Zugabemenge LP-Bildner, rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner

Figures 8 a and b: Air entrainment as a function of mixing time of air-entrained concrete without superplasticizer in relation to air-entraining agent: single added amount of air-entraining agent on the left, double added amount of air-entraining agent on the right

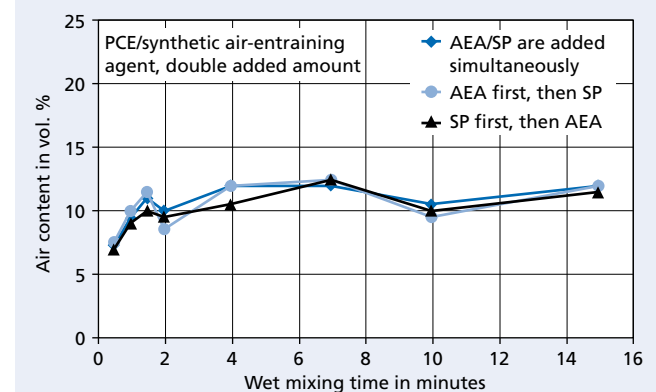
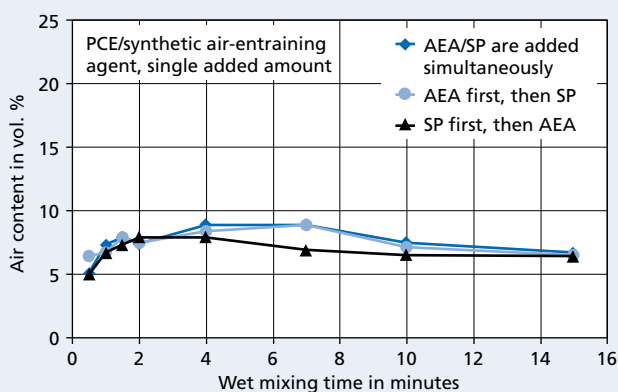


Bild 8 c und d: Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Zugabemenge LP-Bildner: links einfache und rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner

Figures 8 c and d: Air entrainment as a function of mixing time in relation to admixture addition for the combination PCE/syn. air-entraining agent: Single added amount of air-entraining agent on the left, double amount on the right

rd. vier Umdrehungen je Minute (Simulation „Fahren mit langsam drehender Trommel“) eingestellt. Der Transportvorgang wurde über einen Zeitraum von 60 Minuten simuliert.

Unmittelbar nach Beladungsende sowie 10 Minuten, 30 Minuten, 45 Minuten und 60 Minuten nach Beladungsende wurden Luftgehalt und Ausbreitmaß des Frischbetons ermittelt. Zusätzlich zu den Frischbetonprüfungen wurde 10 Minuten, 30 Minuten und 60 Minuten nach Beladungsende jeweils ein Probekörper (Würfel 15 cm) für die Bestimmung der LP-Kennwerte am Festbeton hergestellt. Bei der Variante „Zugabe Fließmittel in den Fahrmischer“ wurde zusätzlich ein Würfel 45 Minuten nach Beladungsende hergestellt. Außerdem wurden 60 Minuten nach Beladungsende drei Probekörper (Würfel 15 cm) für die Prüfung der 28-Tage-Druckfestigkeit hergestellt. Die Probekörper für die Festbetonprüfungen sowie der LP-Topf 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 neben dem Labor des Transportbetonwerks gelagert. Jeweils am Morgen des nächsten Tages wurden die Probekörper in den VDZ nach Düsseldorf geliefert, wo sie im Alter von rd. 24 Stunden ausgeschalt und in die jeweiligen Lagerungen verbracht wurden. Die Lagerungen sowie die Frisch- und Festbetonprüfungen wurden entsprechend der Vorgehensweise der Laborversuche durchgeführt (s. Abschnitt 3.2.3). Die Versuche wurden an zwei Tagen im Juni 2017 bei einer Lufttemperatur von rd. 20 °C durchgeführt.

vessel for the fresh concrete tests were compacted on the vibrating table of the ready-mixed concrete plant. Following compaction, the test specimens for the hardened concrete studies were covered with foil and a damp jute cloth and stored next to the laboratory of the ready-mixed concrete plant. On the morning of each of the following days the test specimens were delivered to VDZ in Düsseldorf, where they were removed from the formwork at an age of around 24 hours and put into the applicable storage. Storage and the fresh and hardened concrete tests were performed in accordance with the procedure employed for the laboratory experiments (s. Section 3.2.3). The tests were conducted on two days in June 2017 at an air temperature of approx. 20 °C.

4 Test results

4.1 Laboratory experiments

4.1.1 Fresh concrete properties

a) Added amounts of air-entraining agent and superplasticizer
The amounts of air-entraining agent and superplasticizer required to obtain the necessary fresh concrete properties are shown in Fig. 3 as a function of the admixture combination and addition sequence. As compared to the stiff concretes without superplasticizer, far smaller quantities of air-entraining agent (particularly synthetic air-entraining agent) have to be added to the superplasticizer concretes (0.11 mass % to 0.14 mass % as opposed to 0.46 mass % with single and 0.22 mass % to 0.28 mass % as opposed to 0.92 with double added amount) to obtain the desired air content of

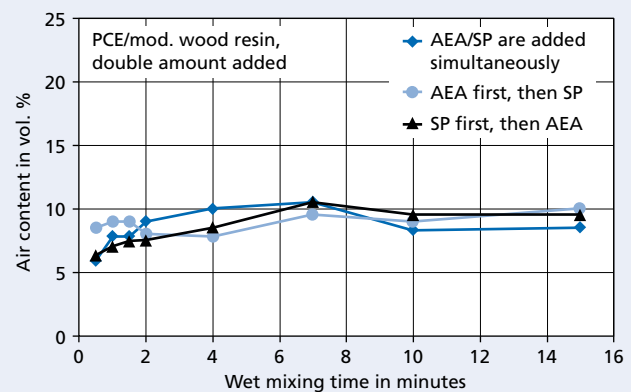
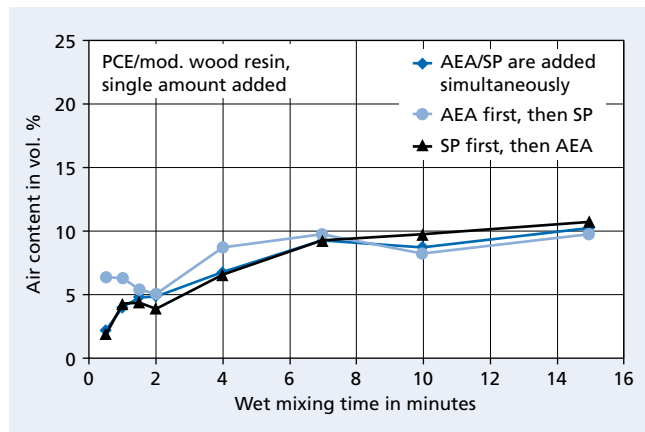


Bild 8 e und f: Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Zugabevariante bei der Kombination PCE/mod. Wurzelharz: links einfache und rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner

Figures 8 e and f: Air entrainment as a function of mixing time in relation to admixture addition for the combination PCE/mod. wood resin: single added amount of air-entraining agent on the left, double amount on the right

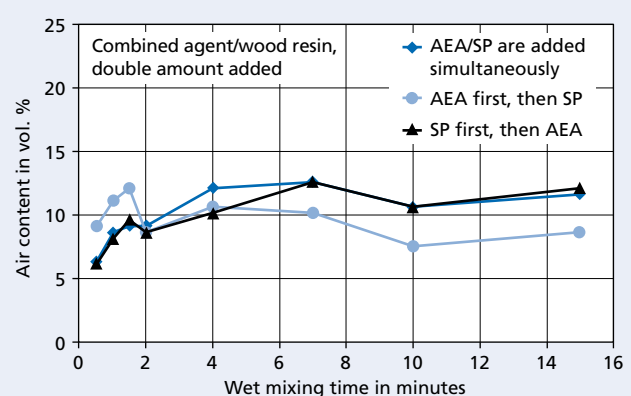
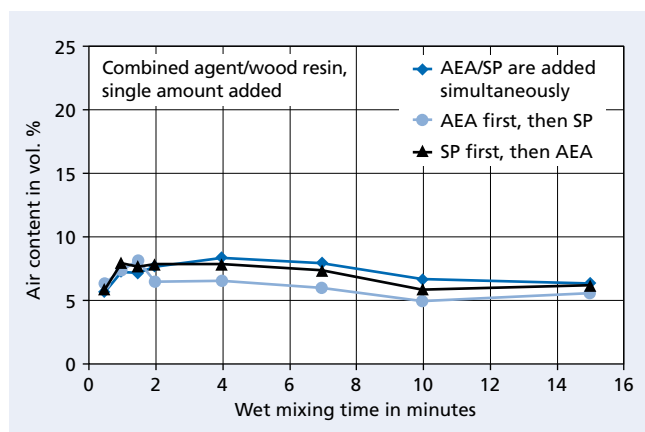


Bild 8 g und h: Mischzeitabhängige Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Zugabevariante bei der Kombination Kombimittel/mod. Wurzelharz: links einfache und rechts doppelte Zugabemenge LP-Bildner

Figures 8 g and h: Air entrainment as a function of mixing time in relation to admixture addition for the combination combined agent/mod. wood resin: single added amount of air-entraining agent on the left, double amount on the right

4 Versuchsergebnisse

4.1 Laborversuche

4.1.1 Frischbetoneigenschaften

a) Zugabemengen LP und FM

Die erforderlichen Mengen an LP-Bildner bzw. Fließmittel zur Erzielung der geforderten Frischbetoneigenschaften sind in Abhängigkeit der Zusatzmittel-Kombination und der Zugabe-Reihenfolge in Bild 3 dargestellt. Im Vergleich zu den steifen Betonen ohne FM sind bei den Fließmittelbetonen insbesondere beim synthetischen LP-Bildner wesentlich geringere Zugabemengen an LP-Bildner (0,11 M.-% bis 0,14 M.-% zu 0,46 M.-% bei einfacher und 0,22 M.-% bis 0,28 M.-% zu 0,92 bei doppelter Zugabemenge) zur Erzielung des gewünschten Luftgehalts von 5,5 Vol.-% erforderlich. Die Zusatzmittel-Zugabemengen wurden nur unwesentlich von der Zugabe-Reihenfolge LP/FM beeinflusst.

b) Konsistenz und Luftgehalt

Die Entwicklung von Luftgehalt und Ausbreitmaß in Abhängigkeit der Zugabe-Reihenfolge und der Zeit zeigen die Bilder 4 a bis i. Das Ausbreitmaß fiel bei allen neun Kombinationen von rd. 52 bis 55 cm (sofort) auf die gewünschten 40 cm bis 45 cm (45 Minuten nach Mischende) ab. Der Luftgehalt fiel i.d.R. vom Prüfzeitpunkt unmittelbar nach Mischende bis zum Zeitpunkt 45 Minuten nach Mischende ab. Bei einzelnen Varianten stieg der Luftgehalt von rd. 4 Vol.-% bis 5 Vol.-% (Prüfzeitpunkt unmittelbar nach Mischende) auf rd. 6 Vol.-% (45 Minuten nach Mischende) an. Dieser Anstieg ist vermutlich auf eine Nachaktivierung von LP-Bildner durch das Aufmischen des Frischbetons vor dem jeweiligen Prüfzeitpunkt (10 Minuten bzw. 45 Minuten) zurückzuführen.

4.1.2 Festbetoneigenschaften

Die 28-Tage-Druckfestigkeit (Bild 5) und die LP-Kennwerte Mikroluftporengehalt (Bild 6) und Abstandsfaktor (Bild 7) wurden durch die Zusatzmittelkombination und die Zugabe-Reihenfolge nur unwesentlich beeinflusst. Bei den beiden steifen Betonen ohne FM wurden wesentlich geringere Abstandsfaktoren und höhere Mikroluftporengehalte erzielt als bei den FM-Betonen. Die weichere Konsistenz der Betone mit Fließmittel (Ausbreitmaß direkt nach Mischende mehr als 50 cm) erleichtert den Aufbau eines Luftporensystems mit mehr größeren Luftporen. Die geringere spezifische Oberfläche des Luftporensystems erfordert einen geringeren Bedarf an LP-Bildner zur Stabilisierung des Luftporensystems. Bei den steifen Betonen ohne FM werden größere Poren während des Mischvorgangs vermehrt in kleinere aufgeteilt. Das feinere Luftporensystem erfordert eine größere Menge an LP-Bildner und eine längere Mischzeit. Die weichere Konsistenz erleichtert damit die Luftporenbildung und erlaubt kürzere Misch-

5.5 vol. %. The amounts of admixture added were only influenced to an insignificant extent by the air-entraining agent/superplasticizer addition sequence.

b) Consistency and air content

Figs. 4 a to i show the development of air content and flow table spread as a function of addition sequence and time. With all nine combinations, the flow table spread decreased from around 52 to 55 cm (immediately) to the desired 40 cm to 45 cm (45 min. after the end of mixing). In general, the air content dropped in the time between testing immediately after the end of mixing and 45 minutes after the end of mixing. In certain cases, the air content increased from around 4 vol. % to 5 vol. % (testing time immediately after end of mixing) to around 6 vol. % (45 minutes after end of mixing). This increase can probably be attributed to the later activation of air-entraining agent as a result of mixing the fresh concrete before each of the testing times (10 minutes and 45 minutes).

4.1.2 Hardened concrete properties

The 28-day compressive strength (Fig. 5) and the air void characteristic values – micro air voids content (Fig. 6) and spacing factor (Fig. 7) – were only slightly influenced by the admixture combination and addition sequence. Far smaller spacing factors and higher micro air voids contents were obtained for the two stiff concretes without superplasticizer than for the superplasticizer concretes. The softer consistency of the concretes with superplasticizer (flow table spread directly after end of mixing more than 50 cm) facilitates the development of an air void system with larger air voids. The smaller specific surface of the air void system requires less air-entraining agent to stabilise the air void system. In the case of the stiff concretes without superplasticizer, more of the larger voids are split up into smaller ones during the mixing process. The finer air void system demands a larger amount of air-entraining agent and a longer mixing time. The softer consistency thus facilitates air entrainment and permits shorter mixing times, but gives rise to poorer air void characteristic values (Figs. 6 and 7).

4.1.3 Air entrainment as a function of mixing time

Figs. 8 a to h show air entrainment as a function of mixing time with single and double added amounts of air-entraining agent in relation to the addition sequence and admixture combination. For the purpose of comparison the curves for the air-entrained concretes without superplasticizer are shown (Figs. 8 a and 8 b). A typical feature of the concretes with a stiff consistency is the later activation of the highly soluble synthetic air-entraining agent with double added amount and long mixing time (Fig. 8 b). A comparable rise in air content was found for the superplasticizer concretes with modified wood resin and with synthetic tenside with double

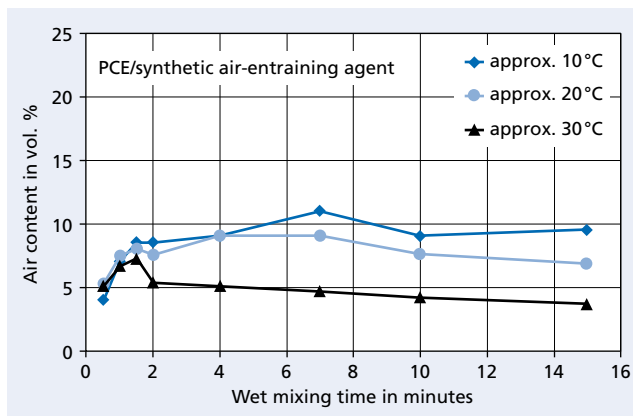


Bild 9: Einfluss der Frischbetontemperatur auf die mischzeitabhängige Luftporenbildung bei der Variante: gleichzeitige Zugabe von PCE und synthetischem LP-Bildner

Figure 9: Influence of fresh concrete temperature on air entrainment as a function of mixing time for the case of: simultaneous addition of PCE and synthetic air-entraining agent

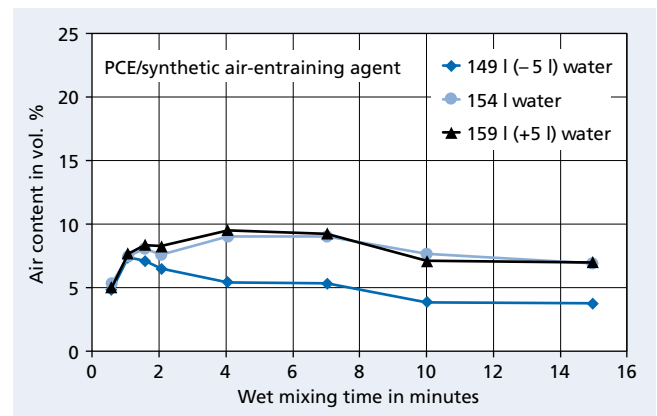


Bild 10: Einfluss des Wassergehalts auf die mischzeitabhängige Luftporenbildung bei der Variante: gleichzeitige Zugabe von PCE und synthetischem LP-Bildner

Figure 10: Influence of water content on air entrainment as a function of mixing time for the case of: simultaneous addition of PCE and synthetic air-entraining agent

Tabelle 2: Zugabemengen von LP und FM für die zwölf Praxisbetone

Table 2: Added amounts of AEA and SP for the twelve practical concretes

No.	Active agent of AEA	Added amount of AEA in mass % w.r.t. cement	Added amount of SP in mass % w.r.t. cement	Mixing time in concrete production	Addition sequence AEA/SP
1	Natural	Single: 0.290	1.40	Long: 90 s	After 30 minutes of transportation simulation, addition of combined agent into ready-mixed concrete lorry with drum revolving at high speed
2	Natural	Double: 0.580	1.40	Short: 45 s	
3	Synthetic	Single: 0.205	1.40	Long: 90 s	
4	Synthetic	Double: 0.410	1.40	Short: 45 s	
5	Natural	Single: 0.220	0.47	AEA 30 s, then SP 60 s	AEA first, then SP directly into the mixer
6	Natural	Double: 0.440	0.47	AEA 15 s, then SP 30 s	
7	Synthetic	Single: 0.140	0.70	AEA 30 s, then SP 60 s	
8	Synthetic	Double: 0.280	0.70	AEA 15 s, then SP 30 s	
9	Natural	Single: 0.280	0.80	AEA/SP simultaneously 90 s	Simultaneous addition of AEA and SP directly into the mixer
10	Natural	Double: 0.560	0.80	AEA/SP simultaneously 45 s	
11	Synthetic	Single: 0.140	0.70	AEA/SP simultaneously 90 s	
12	Synthetic	Double: 0.280	0.70	AEA/SP simultaneously 45 s	

zeiten, führt jedoch zu einer Verschlechterung der LP-Kennwerte (Bilder 6 und 7).

4.1.3 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit

Die Bilder 8 a bis h zeigen die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit einfacher und doppelter Zugabemenge der LP-Bildner in Abhängigkeit der Zugabe-Reihenfolge und der Zusatzmittelkombination. Zum Vergleich wurden die Kurvenverläufe der LP-Betone ohne Fließmittel dargestellt (Bilder 8 a und 8 b). Typisch ist bei den Betonen steifer Konsistenz die Nachaktivierung des gut löslichen synthetischen LP-Bildners bei doppelter Zugabemenge und langer Mischzeit (Bild 8 b). Bei den Fließmittel-Betonen ergab sich beim modifizierten Wurzelharz und beim synthetischen Tensid bei doppelter Zugabemenge ein vergleichbarer Anstieg des Luftgehalts. Bei den Fließmittel-Betonen mit synthetischem Tensid war der für steife LP-Betone ohne FM typische Anstieg bei doppelter Zugabemenge nicht mehr zu erkennen. Der Luftgehalt stieg auch nicht mehr stetig mit zunehmender Mischzeit an. Das Nachaktivierungspotenzial fällt bei FM-Betonen mit synthetischem LP-Bildner geringer aus als bei dem Beton steifer Konsistenz ohne FM. Ursache hierfür ist die wesentlich geringere Menge an LP-Bildner, die im Vergleich zu

added amount. The increase with double added amount typical of stiff air-entrained concretes without superplasticizer could no longer be detected in the superplasticizer concretes with synthetic tenside. The air content also no longer continuously increased with increasing mixing time. In the case of superplasticizer concretes with synthetic air-entraining agent, there is less potential for later activation than with concrete of stiff consistency without superplasticizer. The reason for this is the far smaller quantity of air-entraining agent required to obtain the desired air content as compared to concretes of stiff consistency. The admixture combination and the addition sequence had no significant influence on the air entrainment of the superplasticizer concretes as a function of mixing time (Figs. 8 c to h).

4.1.4 Influence of fluctuations encountered in practice

The influence of the fluctuations encountered in practice was investigated for the case of PCE/synthetic tenside and simultaneous addition of air-entraining agent/superplasticizer at fresh concrete temperatures of 10 °C, 20 °C and 30 °C (Fig. 9) as well as with fluctuations in water content of ± 5 l (Fig. 10). The amounts of admixture added were not varied in the process. It became apparent that high fresh concrete temperatures and low water contents

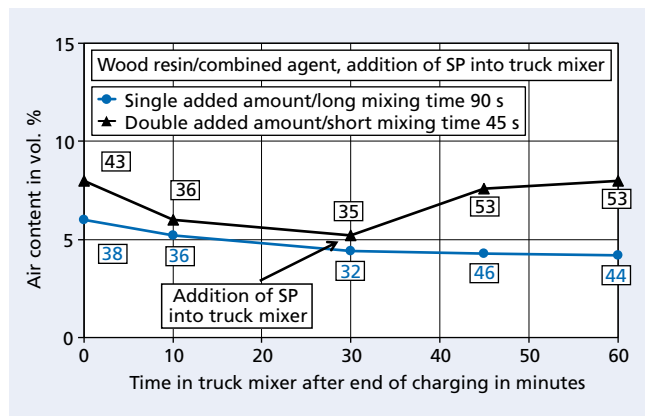


Bild 11: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des LP-Bildners auf Wurzelharzbasis

Figure 11: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of wood resin-based air-entraining agent

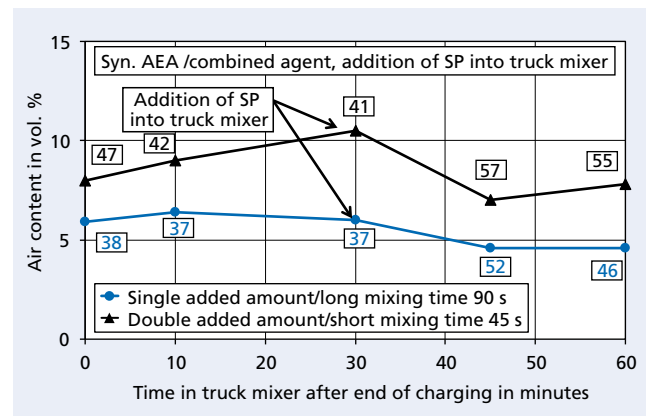


Bild 12: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des synthetischen LP-Bildners

Figure 12: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of synthetic air-entraining agent

Betonen steifer Konsistenz erforderlich ist, um den gewünschten Luftgehalt zu erzielen. Die Zusatzmittelkombination bzw. die Zugabe-Reihenfolge beeinflusste die mischzeitabhängige Luftporenbildung der FM-Betone nicht wesentlich (Bilder 8 c bis h).

4.1.4 Einfluss baupraktischer Schwankungen

Der Einfluss baupraktischer Schwankungen wurde bei der Variante PCE/synthetisches Tensid und gleichzeitige Zugabe LP/FM bei Frischbetontemperaturen von 10 °C, 20 °C und 30 °C (Bild 9) sowie bei Wassergehaltsschwankungen von ± 5 l untersucht (Bild 10). Dabei wurden die Zusatzmittel-Zugabemengen nicht verändert. Es zeigte sich, dass bei hohen Frischbetontemperaturen und geringen Wassergehalten die Luftporenbildung erschwert wird. Bei gleichbleibenden Zugabemengen an LP-Bildner verringerte sich der Luftgehalt. Bei Veränderungen dieser Randbedingungen im Verlauf einer Tagesproduktion (z.B. Betonieren eines längeren Autobahnbauloses) muss der Luftgehalt daher laufend geprüft (nicht nur morgens zu Betonierbeginn!) und die LP-Bildnermenge ggf. angepasst werden.

4.2 Praxisversuche im Transportbetonwerk

4.2.1 Frischbeton

In Tabelle 2 sind die Zugabemengen an LP bzw. FM der Praxisbetone für die Varianten 1 bis 12 zusammengestellt.

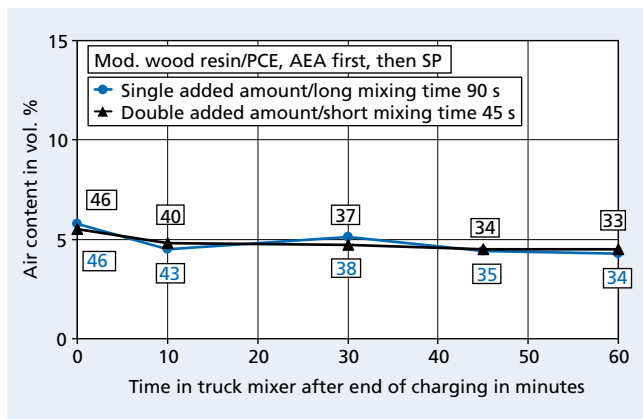


Bild 13: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Zugabemenge des LP-Bildners auf Wurzelharzbasis; Zugabe-Reihenfolge erst LP, dann FM

Figure 13: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and added amount of wood resin-based air-entraining agent; addition sequence: AEA first, then SP

impede air entrainment. The air content decreased with constant added amounts of air-entraining agent. If these boundary conditions are changed in the course of daily production (e.g. casting of concrete for a lengthy section of motorway), the air content therefore has to be constantly checked (not just in the morning before starting casting work!) and the quantity of air-entraining agent has to be adjusted, if necessary.

4.2 Practical tests at ready-mixed concrete plant

4.2.1 Fresh concrete

Table 2 provides a summary of the amounts of air-entraining agent and superplasticizer added to the practical concretes 1 to 12.

a) Addition of plasticizer into truck mixer (concretes 1 to 4)

After addition of superplasticizer into the truck mixer following 30 minutes of transportation simulation, the air content increased with modified wood resin (Fig. 11) and decreased with synthetic tenside (Fig. 12). With a single added amount of air-entraining agent and a long mixing time, the desired air content of around 5.5 vol. % (60 minutes after the end of charging) was slightly undershot with both air-entraining agents, whereas the flow table spread of 44 cm and 46 cm was within or slightly above the desired range of 40 cm to 45 cm. A short mixing time and double the added amount produced an increase in flow table spread (53 cm to

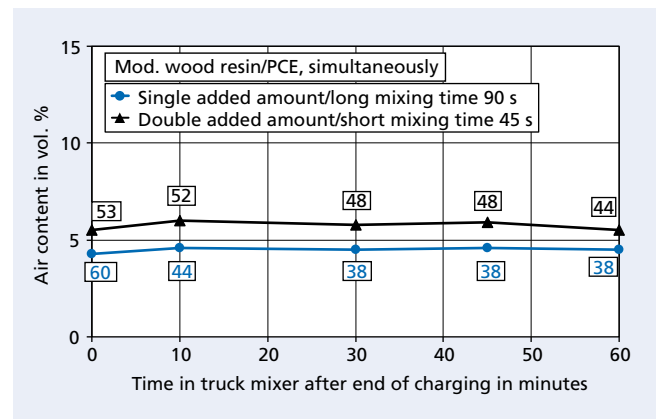


Bild 14: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Zugabemenge des LP-Bildners auf Wurzelharzbasis; Zugabe-Reihenfolge gleichzeitige Zugabe

Figure 14: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and added amount of wood resin-based air-entraining agent; addition sequence: simultaneous addition

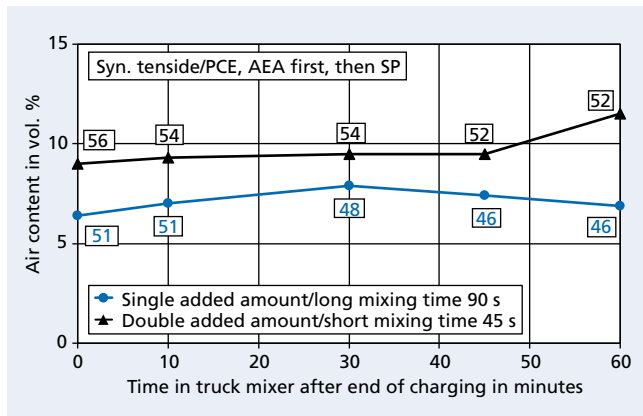


Bild 15: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Zugabemenge des synthetischen LP-Bildners; Variante erst LP, dann FM

Figure 15: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and added amount of synthetic air-entraining agent; method: AEA first, then SP

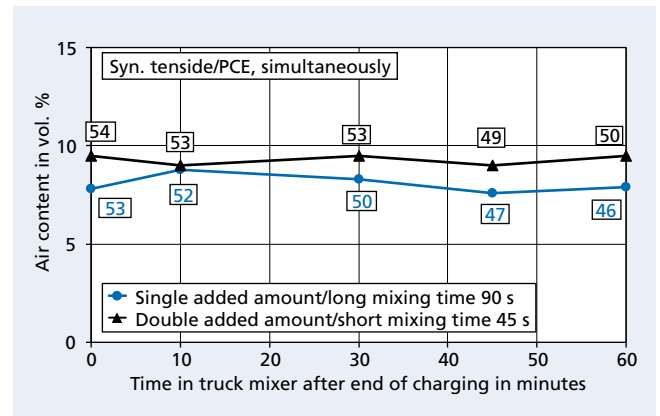


Bild 16: Luftgehalt und Ausbreitmaß (Kasten) in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Zugabemenge des synthetischen LP-Bildners; Variante gleichzeitige Zugabe

Figure 16: Air content and flow table spread (box) as a function of time after end of charging and added amount of synthetic air-entraining agent; method: simultaneous addition

Tabelle 3: Hinweise zur Zusatzmittelzugabe sowie Ergebnisse der Festbetonprüfungen: LP-Kennwerte und 28-Tage-Druckfestigkeit

Table 3: Notes on admixture addition as well as results of hardened concrete tests: Air void characteristic values and 28-day compressive strength

No.	Addition method	Added amounts of admixtures and mixing times	Characteristic value	Minutes after end of charging				28-day compressive strength in N/mm ²
				10	30	45	60	
1	Addition of combined agent into truck mixer, 1.40 mass % w.r.t. cement	Addition of mod. wood resin 0.29 mass % Mixing time 90 s	A in vol. %	4.25	4.27	4.01	4.12	59.0
A ₃₀₀ in vol. %			2.46	2.09	2.06	2.21		
$\bar{L}$ in mm			0.10	0.13	0.13	0.15		
2		Addition of mod. wood resin 0.58 mass % Mixing time 45 s	A in vol. %	5.11	5.09	7.63	8.86	40.0
A ₃₀₀ in vol. %			3.60	2.74	4.96	6.45		
$\bar{L}$ in mm			0.08	0.11	0.09	0.08		
3		Addition of syn. tenside 0.205 mass % Mixing time 90 s	A in vol. %	5.83	7.68	4.84	4.21	57.5
A ₃₀₀ in vol. %			4.20	5.21	2.41	2.03		
$\bar{L}$ in mm			0.10	0.09	0.13	0.14		
4		Addition of syn. tenside 0.41 mass % Mixing time 45 s	A in vol. %	10.6	8.84	8.65	7.53	44.4
A ₃₀₀ in vol. %			6.73	6.52	3.84	3.77		
$\bar{L}$ in mm			0.06	0.06	0.10	0.12		
5	Mod. wood resin first, then PCE	AEA: 0.22 mass %/ PCE: 0.47 mass % Single dosage of AEA 30 s, then SP 60 s	A in vol. %	4.95	5.20		5.01	62.0
A ₃₀₀ in vol. %			2.83	2.77		2.82		
$\bar{L}$ in mm			0.11	0.11		0.11		
6		AEA: 0.44 mass %/ PCE: 0.47 mass % Double dosage of AEA 15 s, then SP 30 s	A in vol. %	5.06	5.50		4.29	61.2
A ₃₀₀ in vol. %			2.71	2.72		2.42		
$\bar{L}$ in mm			0.12	0.17		0.12		
7	Simultaneous addition of PCE and mod. wood resin	AEA: 0.28 mass %/ PCE: 0.80 mass % Single dosage of AEA 30 s, then SP 60 s	A in vol. %	5.08	5.39		4.89	65.5
A ₃₀₀ in vol. %			2.21	1.96		2.24		
$\bar{L}$ in mm			0.13	0.18		0.16		
8		AEA: 0.56 mass %/ PCE: 0.80 mass % Double dosage. AEA/short Mixing time 45 s	A in vol. %	6.87	8.61		5.87	60.9
A ₃₀₀ in vol. %			2.47	2.83		3.08		
$\bar{L}$ in mm			0.15	0.12		0.13		
9	Syn. tenside first, then PCE	AEA: 0.14 mass %/ PCE: 0.70 mass % Single dosage of AEA 30 s, then SP 60 s	A in vol. %	8.01	7.79		6.31	50.5
A ₃₀₀ in vol. %			4.01	4.86		3.61		
$\bar{L}$ in mm			0.11	0.09		0.11		
10		AEA: 0.28 mass %/ PCE: 0.70 mass %/ Double dosage of AEA 15 s, then SP 30 s	A in vol. %	9.07	12.1		12.3	33.7
A ₃₀₀ in vol. %			5.11	6.76		7.12		
$\bar{L}$ in mm			0.10	0.07		0.07		
11	Simultaneous addition of PCE and syn. tenside	AEA: 0.14 mass %/ PCE: 0.70 mass % Single dosage. AEA/long Mixing time 90 s	A in vol. %	7.46	8.41		8.18	42.3
A ₃₀₀ in vol. %			4.26	4.77		4.92		
$\bar{L}$ in mm			0.09	0.10		0.09		
12		AEA: 0.28 mass %/ PCE: 0.70 mass % Double dosage. AEA/short Mixing time 45 s	A in vol. %	9.99	9.82		9.90	36.9
A ₃₀₀ in vol. %			6.08	5.74		5.83		
$\bar{L}$ in mm			0.07	0.08		0.08		

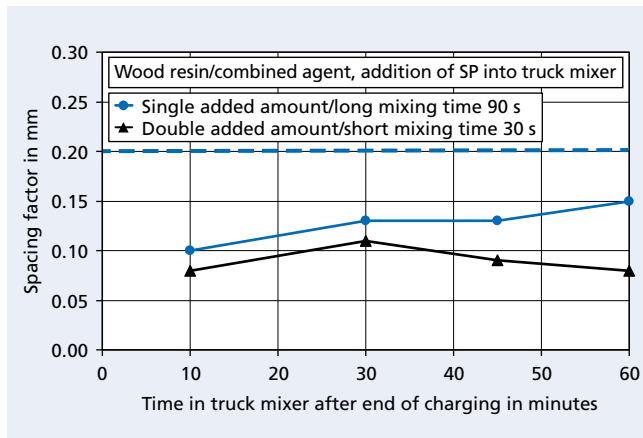


Bild 17: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des LP-Bildners auf Wurzelharzbasis (Zugabe FM in den Fahrmischer)
Figure 17: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of wood resin-based air-entraining agent (addition of SP into truck mixer)

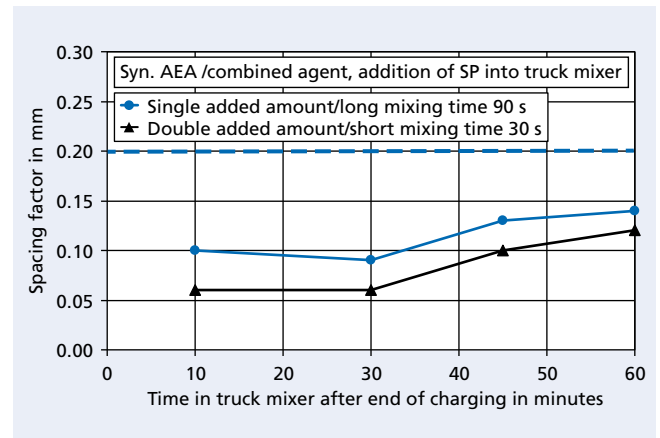


Bild 18: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des synthetischen LP-Bildners (Zugabe FM in den Fahrmischer)
Figure 18: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of synthetic air-entraining agent (addition of SP into truck mixer)

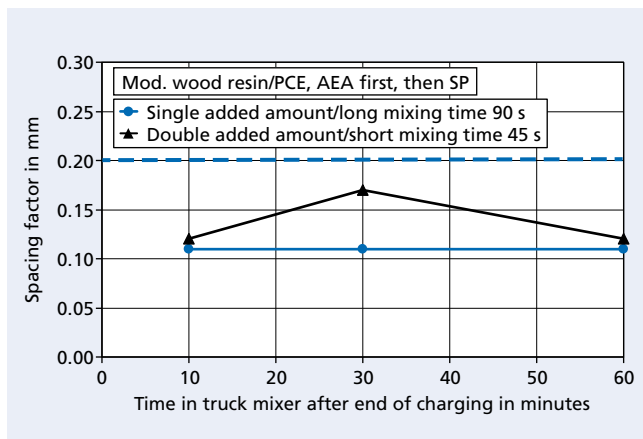


Bild 19: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des mod. Wurzelharzes; Zugabe-Reihenfolge „erst LP, dann FM“
Figure 19: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of mod. wood resin; addition sequence „AEA first, then SP“

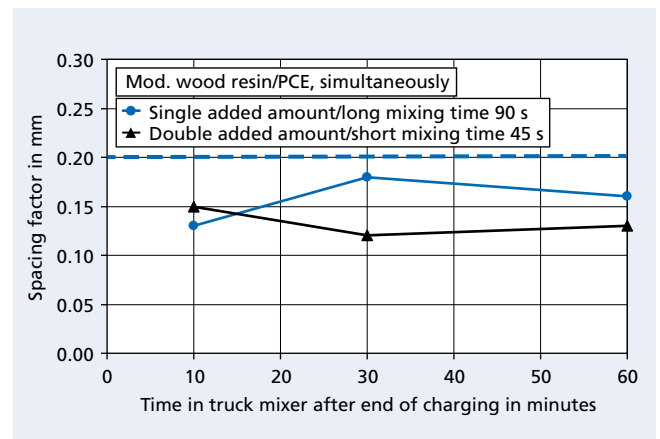


Bild 20: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des mod. Wurzelharzes; Zugabe-Reihenfolge „LP und FM gleichzeitig“
Figure 20: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of mod. wood resin; addition sequence „AEA and SP simultaneously“

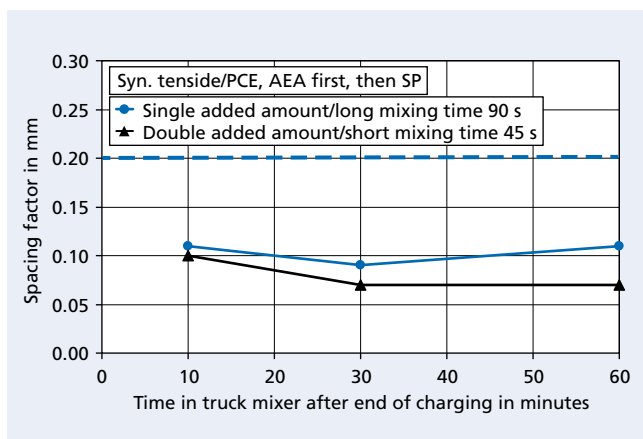


Bild 21: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des synthetischen Tensids; Zugabe-Reihenfolge „erst LP, dann FM“
Figure 21: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of synthetic tenside; addition sequence „AEA first, then SP“

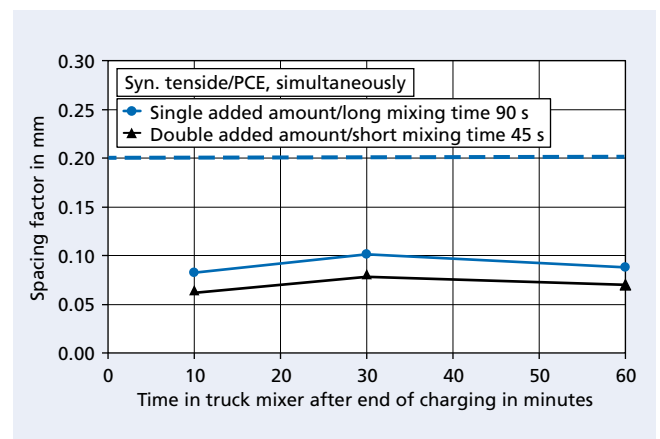


Bild 22: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zeit nach Beladungsende und der Mischzeit sowie der Zugabemenge des synthetischen Tensids; Zugabe-Reihenfolge „LP und FM gleichzeitig“
Figure 22: Spacing factor as a function of time after end of charging and mixing time, as well as added amount of synthetic tenside; addition sequence „AEA and SP simultaneously“

a) Zugabe des Fließmittels in den Fahrmischer (Betone 1 bis 4)
Nach der Fließmittelzugabe in den Fahrmischer nach 30 Minuten Transportsimulation zeigte sich beim modifizierten Wurzelharz ein Anstieg des Luftgehalts (Bild 11) und beim synthetischen Tensid ein Abfallen des Luftgehalts (Bild 12). Bei einfacher Zugabemenge und langer Mischzeit des LP-Bildners wird der angestrebte Luftgehalt von rd. 5,5 Vol.-% (60 Minuten nach Beladungsende) bei beiden LP-Bildnern geringfügig unterschritten, das Ausbreitmaß liegt mit 44 cm im bzw. mit 46 cm etwas über dem angestrebten Bereich von 40 cm bis 45 cm. Bei kurzer Mischzeit und doppelter Zugabemenge erhöhen sich Ausbreitmaß (53 cm bis 55 cm) und Luftgehalt (rd. 7 Vol.-%). Bei langer Mischzeit und einfacher Zugabemenge verläuft der Luftgehalt insgesamt gleichmäßiger als bei kurzer Mischzeit und doppelter Zugabemenge.

b) Zugabe der Zusatzmittel direkt in den Mischer (Betone 5 bis 12)

Bei der Zugabe von LP und FM direkt in den Mischer wurden die typischen Zugabe-Reihenfolgen der Erstprüfung: erst LP, dann FM (Betone 5 bis 8 nach Tabelle 2) und der Praxisanwendung: gleichzeitige Zugabe von LP und FM (Betone 9 bis 12 nach Tabelle 2) überprüft. Untersucht wurden die Mischzeitvarianten „kurze Mischzeit und doppelte Zugabemenge“ und „lange Mischzeit und einfache Zugabemenge“.

Beim modifizierten Wurzelharz fiel infolge einer etwas zu geringen Zusatzmittelzugabe der Luftgehalt insgesamt etwas zu gering und die Konsistenz etwas zu steif aus (Bilder 13 und 14). Bei der Variante mit synthetischem LP-Bildner fielen sowohl der Luftgehalt mit rd. 7 Vol.-% als auch das Ausbreitmaß mit 46 cm etwas zu hoch aus (Bilder 15 und 16). Die Zugabe-Reihenfolge hatte keinen Einfluss auf die LP-Bildung. Bei doppelter Dosierung des LP-Bildners war beim synthetischen Tensid nur ein geringer Anstieg des Luftgehalts insgesamt zu verzeichnen. Mit zunehmender Transportdauer (Nachaktivierung) war ebenfalls kein nennenswerter Anstieg festzustellen. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen werden damit durch die Praxisversuche bestätigt.

4.2.2 Festbeton

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Festbetonprüfungen zusammengestellt.

a) Druckfestigkeit

Die Probekörper für die Prüfung der 28-Tage-Druckfestigkeit wurden 60 Minuten nach Beladungsende hergestellt. Wenn der Luftgehalt im Bereich der geplanten 5,5 Vol.-% lag, betrug die Druckfestigkeit zwischen 50 N/mm² und 60 N/mm² (s. Tabelle 3, rechte Spalte) und lag damit im Bereich der Laborversuche (50 N/mm² bis 55 N/mm², s. Bild 5).

b) LP-Kennwerte

Die LP-Kennwerte erfüllten bei allen zwölf hergestellten Betonen die Anforderungen an die in einer Erstprüfung zu erzielenden Eigenschaften: $\geq 1,8$ Vol.-% beim Mikroluftporengehalt und $\leq 0,20$ mm beim Abstandsfaktor (s. Tabelle 3). In den Bildern 17 bis 21 wurden die Abstandsfaktoren dargestellt (Bilder 17 und 18: Nachträgliche FM-Zugabe in den Fahrmischer; Bilder 19 bis 22: Zusatzmittelzugabe direkt in den Mischer). Ein Einfluss der Zugabe-Reihenfolge der Zusatzmittel auf die LP-Kennwerte konnte nicht festgestellt werden. Bei doppelter LP-Bildner-Zugabemenge waren erwartungsgemäß entsprechend den höheren Frischbetonluftgehalten (s. Bild 11 bis 16) ebenfalls bessere LP-Kennwerte (geringere Abstandsfaktoren und höhere Mikroluftporengehalte) zu verzeichnen.

5 Zusammenfassung und Empfehlungen

5.1 Zusammenfassung

Die Betonbauweise wird zunehmend auch für Verkehrsflächen im innerstädtischen Bereich, z.B. für Kreisverkehre und Busspuren, eingesetzt. Der LP-Beton wird im Transportbetonwerk hergestellt, mit Fahrmischern zur Einbaustelle gebracht und dort meist hän-

55 cm) and air content (around 7 vol. %). With a long mixing time and single added amount, the air content is altogether more uniform than with a short mixing time and double the added amount.

b) Addition of admixture directly into mixer (concretes 5 to 12)

Direct addition of AEA and SP into the mixer was used to check the typical addition sequences from the initial test: AEA first, then SP (concretes 5 to 8 in accordance with Table 2) and from practical usage: simultaneous addition of AEA and SP (concretes 9 to 12 in accordance with Table 2). The mixing time variations „short mixing time and the double amount added“ and „long mixing time and single amount added“ were studied.

In the case of modified wood resin, addition of a slightly inadequate amount of admixture led to the overall air content being slightly too low and the consistency being somewhat too stiff (Figs. 13 and 14). With use of synthetic air-entraining agent, both the air content of around 7 vol. % and the flow table spread of 46 cm were slightly too high (Figs. 15 and 16). The addition sequence had no influence on air entrainment. Doubling the dosage of air-entraining agent only led to a slight overall increase in air content with synthetic tenside. Also, no relevant increase was observed with increasing transportation time (later activation). The practical tests thus confirmed the results of the laboratory scale tests.

4.2.2 Hardened concrete

The results of the hardened concrete tests are shown in Table 3.

a) Compressive strength

The test specimens for testing the 28-day compressive strength were produced 60 minutes after the end of charging. When the air content was in the planned 5.5 vol. % range, the compressive strength was between 50 N/mm² and 60 N/mm² (s. Table 3, right column) and thus around the same range as in the laboratory experiments (50 N/mm² to 55 N/mm², s. Fig. 5).

b) Air void characteristic values

The air void characteristic values of all twelve concretes produced met the requirements for the properties set down in the initial test: Micro air voids content ≥ 1.8 vol. % and spacing factor ≤ 0.20 mm (s. Table 3). The spacing factors are shown in Figs. 17 to 21 (Figs. 17 and 18: subsequent addition of SP into truck mixer; Figs. 19 to 22: direct addition of admixture into mixer). The admixture addition sequence was not found to have any influence on the air void characteristic values. As was to be expected, adding the double amount of air-entraining agent also led to better air void characteristic values (smaller spacing factors and higher micro air voids contents) on account of the associated higher fresh concrete air contents (s. Figs. 11 to 16).

5 Summary and recommendations

5.1 Summary

Concrete construction methods are being ever more widely used for traffic areas in urban areas, e.g. for roundabouts and bus lanes. Air-entrained concrete is produced at ready-mixed concrete plants, transported to the spreading site in truck mixers and then generally placed manually or using light placing equipment. The softer consistency required for placement is set by adding superplasticizer (SP).

Another scope of application for air-entrained concrete with SP is waterways engineering. Here, there have been reports of major problems with the segregation of concretes. Interaction between AEA and SP, as well as the fluctuations in water content and temperature encountered in practice, increase the risk of a negative influence on air entrainment and the stability of the fresh concrete. Possible reasons for this are the later activation of the air-entraining agent in the truck mixer and a non-uniform sequence of AEA and SP. Testing in advance based on realistic construction conditions could provide an early indication of adverse developments. So far there has not been any recommendation for an extended initial test with the combined use of AEA and SP.

disch oder mit leichten Einbaugeräten eingebaut. Die für den Einbau erforderliche weichere Konsistenz wird durch die Fließmittelzugabe (FM) eingestellt.

Ein weiteres Anwendungsfeld von LP-Beton mit FM ist der Wasserbau. Hier wurde von großen Problemen mit entmischten Betonen berichtet. Wechselwirkungen zwischen LP und FM und baupraktische Schwankungen von Wassergehalt und Temperatur erhöhen das Risiko, dass Luftporenbildung und Stabilität des Frischbetons beeinträchtigt werden. Ursachen sind möglicherweise u.a. die nachträgliche Aktivierung des LP-Bildners im Fahrmischer oder eine nicht einheitliche Zugabe-Reihenfolge von LP und FM. Durch Prüfungen im Vorfeld unter Einbeziehung baupraktischer Bedingungen könnten Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden. Für die kombinierte Verwendung von LP und FM gab es bisher keine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung.

Die Entwicklung einer Prüfvorschrift für erweiterte Erstprüfungen im Labor und die Feststellung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf baupraktische Verhältnisse erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die Erfahrungen der Hersteller von LP-Beton (Baufirmen und Transportbetonwerke) mit einem Fragebogen erfasst und typische Zusatzmittelkombinationen und Zugabe-Reihenfolgen von LP und FM für die Labor- und Praxisversuche ausgewählt. Anschließend wurde in Laborversuchen die Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton untersucht. Schließlich wurden Praxisversuche im Transportbetonwerk durchgeführt. Der Vergleich der Versuchsergebnisse ermöglichte eine Aussage zur Übertragbarkeit von Laborversuchen auf baupraktische Verhältnisse. Als Ergebnis wurde eine Empfehlung für eine erweiterte Erstprüfung bei der kombinierten Verwendung von LP und FM erarbeitet, die eine zielgerechte Luftporenbildung in der Praxis sicherstellen soll.

Die Befragung zur Zugabe-Reihenfolge von LP-Bildner und Fließmittel ergab, dass zum Zeitpunkt der Erstprüfung im Labor in 47 % der Fälle zuerst der LP-Bildner und danach das Fließmittel zugegeben wurde. Bei der Herstellung in der Praxis in der Mischanlage entfielen 61 % der Antworten auf die gleichzeitige Zugabe von LP und FM. Grund hierfür dürfte die damit verbundene kürzere Mischzeit sein, die einen höheren Durchsatz der Mischanlage erlaubt. Es wurden zwei LP-Bildner mit natürlicher (mod. Wurzelharz) bzw. synthetischer Wirkstoffbasis (Alkylsulfat) mit geringem bzw. hohem Nachaktivierungspotenzial und zwei Fließmittel (PCE aus dem Bereich Transportbeton und Kombinationsprodukt aus Naphthalinsulfonat/Melaminsulfonat) eines Herstellers ausgewählt und in verschiedenen Kombinationen FM/LP eingesetzt.

In den Laborversuchen wurden der Einfluss der Art und der Zugabe-Reihenfolge der Zusatzmittel sowie der Mischzeit auf die Luftporenbildung mit einer Standardmischung untersucht. Die Frischbetone wurden nach einem festgelegten Mischregime so hergestellt, dass sie 45 Minuten nach Ende der Mischzeit einen Luftgehalt von $(5,5 \pm 0,5)$ Vol.-% und ein Ausbreitmaß von 40 cm bis 45 cm aufwiesen. Dabei zeigte sich, dass bei den Betonen mit Fließmittel wesentlich geringere Mengen an LP-Bildner erforderlich waren als bei den steifen Betonen ohne FM. Anschließend wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit einfacher und doppelter Zugabemenge in Abhängigkeit von der Zusatzmittelkombination und der Zugabe-Reihenfolge ermittelt. In die Auswertung wurden ebenfalls die Betone ohne Fließmittel einbezogen. Es zeigte sich, dass die Zugabe-Reihenfolge die mischzeitabhängige Luftporenbildung und die LP-Kennwerte nicht beeinflusste. Das bei steifen Betonen ohne FM typische Nachaktivierungspotenzial bei synthetischen LP-Bildnern war kaum mehr ausgeprägt. Ursache dafür ist vermutlich die wesentlich geringere Zugabemenge an LP-Bildner bei weichen LP-Betonen. Die Versuche im Transportbetonwerk zeigten, dass die Ergebnisse der Laborversuche auf Praxisverhältnisse übertragbar sind.

Development of a test specification for extended initial tests in the laboratory and establishment of the transferability of the results to practical construction conditions took place in several stages. The first step involved conducting a survey with a questionnaire among producers of air-entrained concrete (building companies and ready-mixed concrete plants) and selecting typical AEA/SP admixture combinations and addition sequences for the laboratory and practical tests. Air entrainment was then investigated in the fresh and hardened concrete in laboratory experiments. Finally, practical tests were performed at the ready-mixed concrete plant. Comparison of the test results permitted conclusions to be drawn about the transferability of laboratory experiments to practical construction conditions. A concluding recommendation was drawn up for an extended initial test with the combined use of AEA and SP with the aim of ensuring the required air entrainment in practice.

The survey on the air-entraining agent and superplasticizer addition sequence revealed that, on performance of the initial test in the laboratory, the air-entraining agent was added first and then the superplasticizer in 47 % of cases. In the case of practical production at the mixing plant, 61 % of the answers mentioned the simultaneous addition of AEA and SP. This is probably due to the associated shorter mixing time, permitting a higher mixing plant throughput. Two air-entraining agents with natural (modified wood resin) and synthetic (alkyl sulphate) active agent with low and high potential for later activation, and two superplasticizers (PCE as used in ready-mixed concrete and a combined product made of naphthalene sulfonate/melamine sulfonate) from one producer were selected and used in different combinations of SP/AEA:

The influence of the type and addition sequence of the admixtures and of the mixing time on air entrainment was investigated with a standard mixture in laboratory experiments. The fresh concretes were produced in accordance with a specified mixing scheme in such a way that they exhibited an air content of (5.5 ± 0.5) vol. % and a flow table spread of 40 cm to 45 cm 45 minutes after the end of the mixing time. It became apparent that considerably smaller quantities of air-entraining agent were required for the concretes with superplasticizer than for the stiff concretes without SP. Based on the mixing time, air entrainment with single and double added amount was then determined in relation to the admixture combination and the addition sequence. The concretes without superplasticizer were also included in the evaluation. It became apparent that the addition sequence did not affect air entrainment as a function of mixing time or the air void characteristic values. There was virtually no evidence of the potential for later activation typical of stiff concretes without SP with synthetic air-entraining agents. This is probably due to the fact that far less air-entraining agent is added with soft air-entrained concretes. The tests performed at the ready-mixed concrete plant revealed that the results of the laboratory experiments can be transferred to practical conditions.

5.2 Recommendations for practical use

The potential for later activation to be expected in practice can be estimated in the course of the initial test in the laboratory. The later activation can be checked by extending the mixing time with higher added amounts of air-entraining agent. The current standard procedure for air-entrained concretes without superplasticizer can also be employed for air-entrained concretes with superplasticizer. A sufficiently long mixing time when producing the concrete is a particularly important factor. Changes to the fresh concrete temperature and water content can have an influence on air entrainment. In practical construction situations, the air content of the fresh concrete is therefore to be checked at regular intervals, in particular in the case of significant changes to the above-mentioned parameters, and the added amounts of admixtures are to be adapted to changes in the boundary conditions, if necessary.

5.2 Empfehlungen für die Praxis

Das in der Praxis zu erwartende Nachaktivierungspotenzial kann im Rahmen der Erstprüfung im Labor abgeschätzt werden. Die Nachaktivierung kann durch die Verlängerung der Mischzeit mit überhöhten LP-Bildner-Zugabemengen überprüft werden. Die bisher gängige Vorgehensweise bei LP-Betonen ohne Fließmittel kann auch für LP-Betone mit Fließmittel verwendet werden. Wichtig ist insbesondere eine ausreichend lange Mischzeit bei der Herstellung des Betons. Änderungen der Frischbetontemperatur und des Wassergehalts können die Luftporenbildung beeinflussen. In der Baupraxis ist der Luftgehalt des Frischbetons daher regelmäßig insbesondere bei wesentlichen Änderungen in den benannten Einflussgrößen zu überprüfen und die Zugabemenge der Zusatzmittel ggf. an Veränderungen der Randbedingungen anzupassen.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben IGF 18854 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 Bundestages gefördert.

Note on sponsorship

The IGF project 18854 N of the research association VDZ gGmbH was sponsored by the Federation of Industrial Cooperative Research Associations within the framework of the scheme to promote Industrial Collective Research and Development (IGF) of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy on the basis of a decision of the German Bundestag.

Literatur / Literature

- [1] Merkblatt für Planung, Konstruktion und Bau von Verkehrsflächen aus Beton. M VaB, Teil 1: Kreisverkehre, Busverkehrsflächen und Rastanlagen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 2013
- [2] Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 45 (1995) H. 10, S. 724–730
- [3] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 73, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf 2009
- [4] Deutsche Bauchemie e. V.: Informationsschrift „Herstellen von LP-Beton“, 2. Ausgabe, Frankfurt 2013
- [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] IGF-Forschungsvorhaben 17227 N „Einfluss der Mischdauer auf die Luftporenbildung in Frisch- und Festbeton – Übertragbarkeit kleinformatischer Laborversuche auf die Verhältnisse einer großformatigen Mischanlage“

