

Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf

Zusammenwirken von Luftporenbildner und Fließmittel in Beton

Interactions of air-entraining agents and plasticizers in concrete

Übersicht

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

1 Einleitung

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

Abstract

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

1 Introduction

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

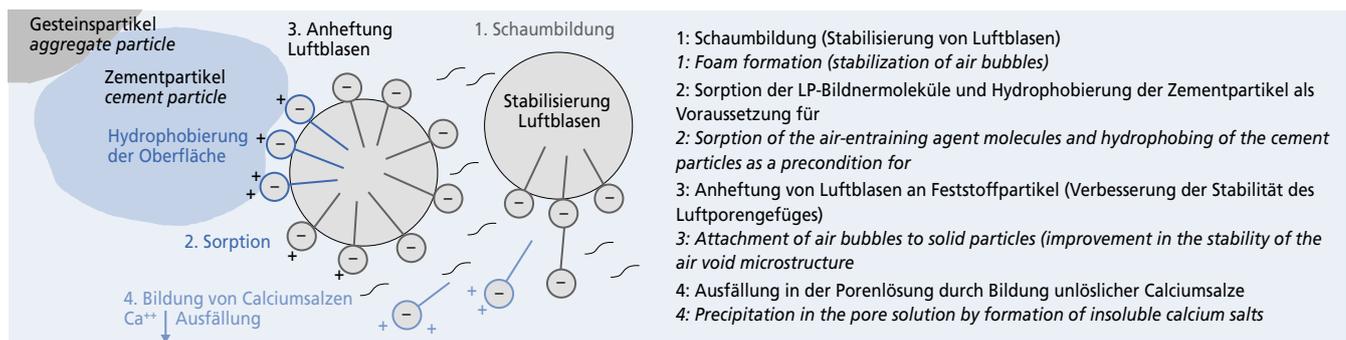


Bild 1: Wirkungsmechanismen der Luftporenbildung
Figure 1: Action mechanisms of air void formation

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

2 Stand der Kenntnis

2.1 Luftporenbildner

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

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

2.2 Fließmittel

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

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

2 Current state of knowledge

2.1 Air-entraining agents

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

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

2.2 Plasticizers

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

2.3 Kombinierte Zugabe von LP-Bildner und Fließmittel

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

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

3 Versuchsdurchführung

3.1 Ziel und Umfang der Versuche

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

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

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

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

2.3 Combined addition of air-entraining agent and plasticizer

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

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

Tafel 2: Übersicht über die verwendeten Fließmittel und LP-Bildner (Konzentrate)

Table 2: Overview of the plasticizers and air-entraining agents (concentrates) used

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

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

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

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

3.2 Ausgangsstoffe

a) Zusatzmittel (LP-Bildner und Fließmittel)

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

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

3 Test procedure

3.1 Aim and extent of the tests

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

3.2 Starting materials

a) Admixtures (air-entraining agents and plasticizers)

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

b) Cement

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

Tafel 3: Chemische und physikalische Kennwerte der verwendeten Zemente

Table 3: Characteristic chemical and physical parameters of the cements used

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

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

b) Zement

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

c) Gesteinskörnung

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

d) Zugabewasser

Für die Herstellung der Betone wurde Düsseldorfer Leitungswasser verwendet.

3.3 Luftporenbildung im Feinbeton

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

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

3.4 Luftporenbildung in Frisch- und Festbeton

3.4.1 Betonzusammensetzungen

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

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

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

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

c) Aggregate

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

d) Mixing water

Düsseldorf mains water was used for producing the concretes.

3.3 Air void formation in fine concrete

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

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

Tafel 5: Zement/Zusatzmittelkombinationen (Zementgehalt 320 kg/m³, w/z-Wert 0,50)
 Table 5: Cement/admixture combinations (cement content 320 kg/m³, w/c ratio 0.50)

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

¹⁾ Zeitraum von 30 bzw. 45 Minuten nach Mischende: Luftgehalt (5,5 ± 0,5) Vol.-% und Ausbreitmaß 49 cm bis 55 cm (F4)
¹⁾ Period from 30 or 45 minutes after end of mixing: air content 5.5 ± 0.5 vol. % and flow table spread 49 cm to 55 cm (F4)

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

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

3.4.2 Herstellung, Lagerung und Prüfung

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

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

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

3.4 Air void formation in fresh and hardened concrete

3.4.1 Concrete compositions

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

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

3.4.2 Production, storage and testing

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

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

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

Nach der Herstellung wurden die Probekörper (24 ± 1) Stunden im Klimaraum bei einer Lufttemperatur von ($20,0 \pm 2,0$) °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:

a) Druckfestigkeit

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

b) Luftporenkennwerte

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

4 Versuchsergebnisse

4.1 Luftporenbildung im Feinbeton

4.1.1 Erforderliche LP-Bildner-Zugabemenge

Die Zugabemengen an LP-Bildner zur Erreichung des geforderten Luftgehalts im Feinbeton ($(5,5 \pm 0,5)$ Vol.-%, Mischdauer zwei Minuten) sind in Tafel 4 zusammengestellt. Vorversuche mit verlängerter Mischdauer hatten gezeigt, dass weiteres Mischen den Luftgehalt nicht erhöhte und dass der LP-Bildner vollständig aktiviert war. Die beiden Wurzelharze erforderten vergleichbare Zugabemengen. Bei dem synthetischen Tensid 1 wurden im Vergleich zu den natürlichen LP-Bildnern wesentlich geringere Zugabemengen benötigt. Unabhängig von der Wirkstoffart des LP-Bildners waren beim CEM II- und CEM III-Zement höhere Dosierungen erforderlich als beim CEM I-Zement. Ursache ist vermutlich die größere Oberfläche des CEM II- bzw. CEM III-Zements, die zu einer verstärkten Sorption des LP-Bidners führt. Die Mahlfineiten betragen 3 250/3 680/4 210 cm²/g nach Blaine (CEM I-/CEM II/B-S-/CEM III/A-Zement, Tafel 3).

4.1.2 Einfluss des Fließmittels auf die Luftporenbildung

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

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

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

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

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

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

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

a) Compressive strength

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

b) Air void parameters

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

4 Test results

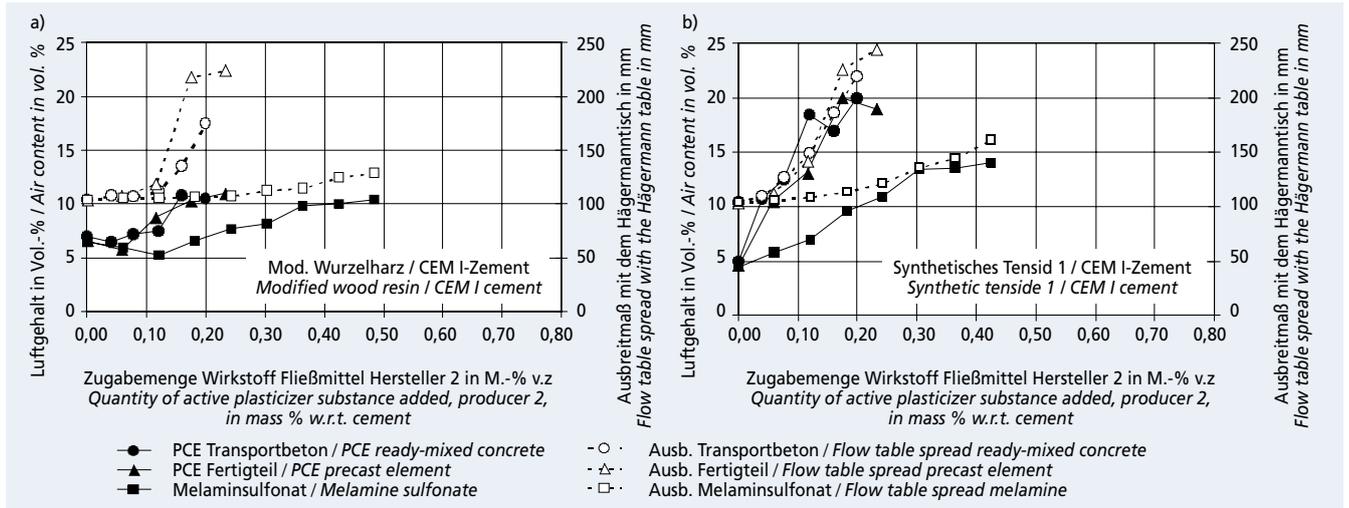
4.1 Air void formation in fine concrete

4.1.1 Required addition levels of air-entraining agent

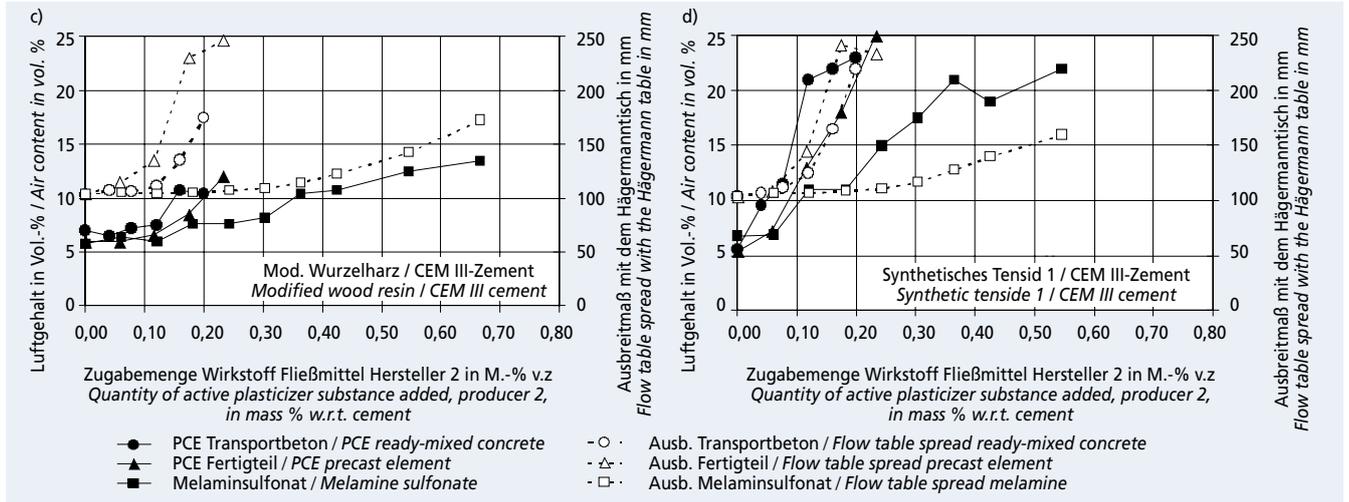
The quantities of air-entraining agent needed to achieve the required air content in fine concrete (5.5 ± 0.5 vol. %, mixing time two minutes) are listed in Table 4. Preliminary tests with extended mixing times had shown that further mixing did not increase the air content and that the air-entraining agents were fully activated. The two wood resins required comparable addition levels. Substantially smaller addition levels were required for synthetic tenside 1 when compared with the natural air-entraining agents. Regardless of the type of active substance in the air-entraining agent higher addition levels were required for the CEM II and CEM III cements than for the CEM I cement. This is presumably due to the larger surface areas of the CEM II and CEM III cements, which lead to increased sorption of the air-entraining agents. The finenesses were 3 250/3 680/4 210 cm²/g Blaine (CEM I/CEM II/B-S/CEM III/A cement, Table 3).

4.1.2 Influence of the plasticizer on air void formation

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



Bilder 2a und b: Luftporenbildung und Konsistenz in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 bei Verwendung des CEM I-Zements: links LP-Bildner auf Wurzelharzbasis und rechts synthetisches Tensid 1
Figures 2a and b: Air void formation and consistency relative to the type and addition level of the plasticizer from producer 2 when using CEM I cement: left – air-entraining agent based on wood resin, and right – synthetic tenside 1



Bilder 2c und d: Luftporenbildung und Konsistenz in Abhängigkeit von der Art und Zugabemenge der Fließmittel des Herstellers 2 bei Verwendung des CEM III-Zements: links LP-Bildner auf Wurzelharzbasis und rechts synthetisches Tensid 1
Figures 2c and d: Air void formation and consistency relative to the type and addition level of the plasticizer from producer 2 when using CEM III cement: left – air-entraining agent based on wood resin, and right – synthetic tenside 1

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

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

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

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

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

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

4.2 Luftporenbildung im Frisch- und Festbeton

4.2.1 Zugabemenge Zusatzmittel in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

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

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

4.2.2 Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

4.2.2.1 Konsistenz

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

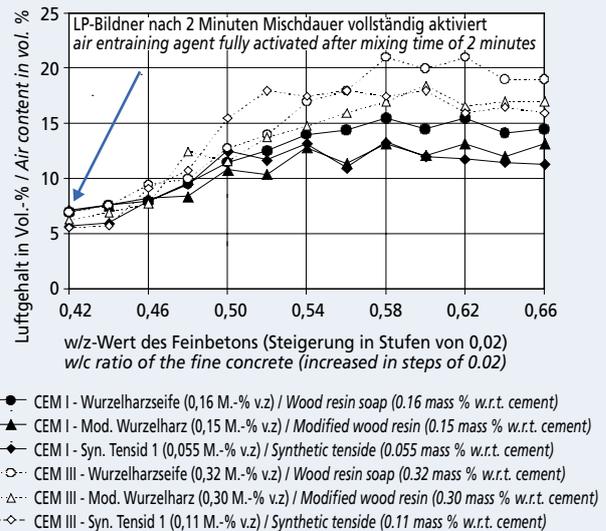


Bild 3: Luftgehalt des Feinbetons in Vol.-% in Abhängigkeit von der zusätzlichen Wasserzugabe, dem Zement und dem LP-Bildner (Ausbreitmaße w/z = 0,50 rd. 130 mm, w/z = 0,58 rd. 180 mm und w/z = 0,66 rd. 210 mm)

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

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

4.2 Air void formation in fresh and hardened concrete

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

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

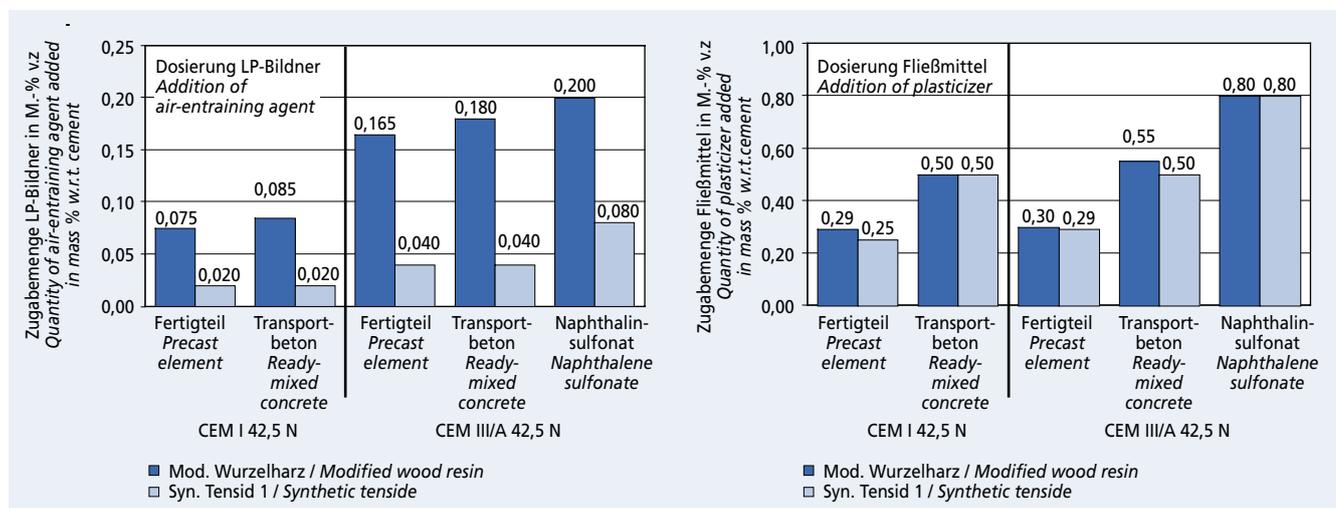
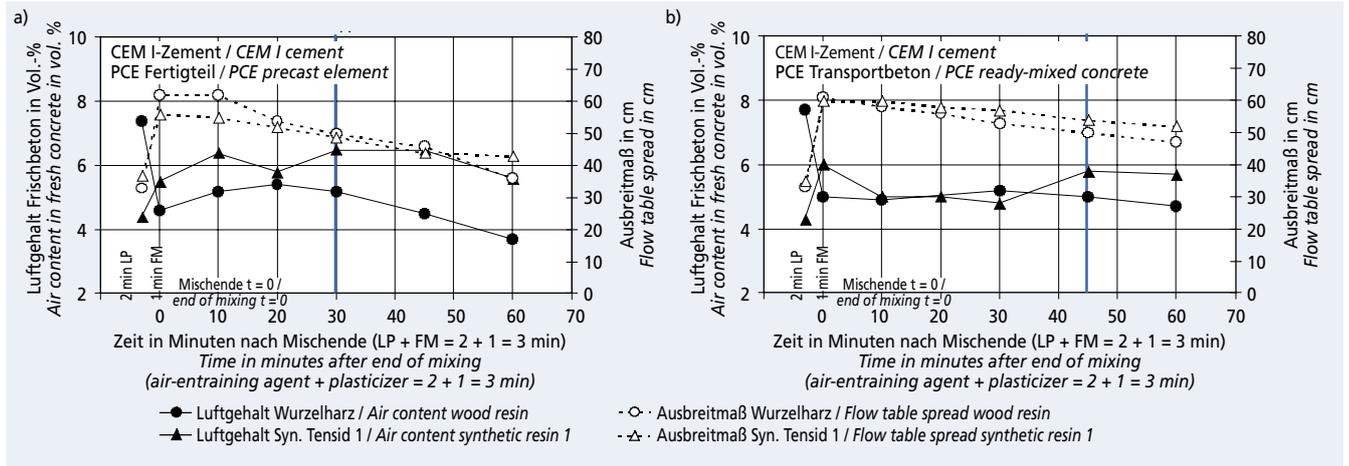
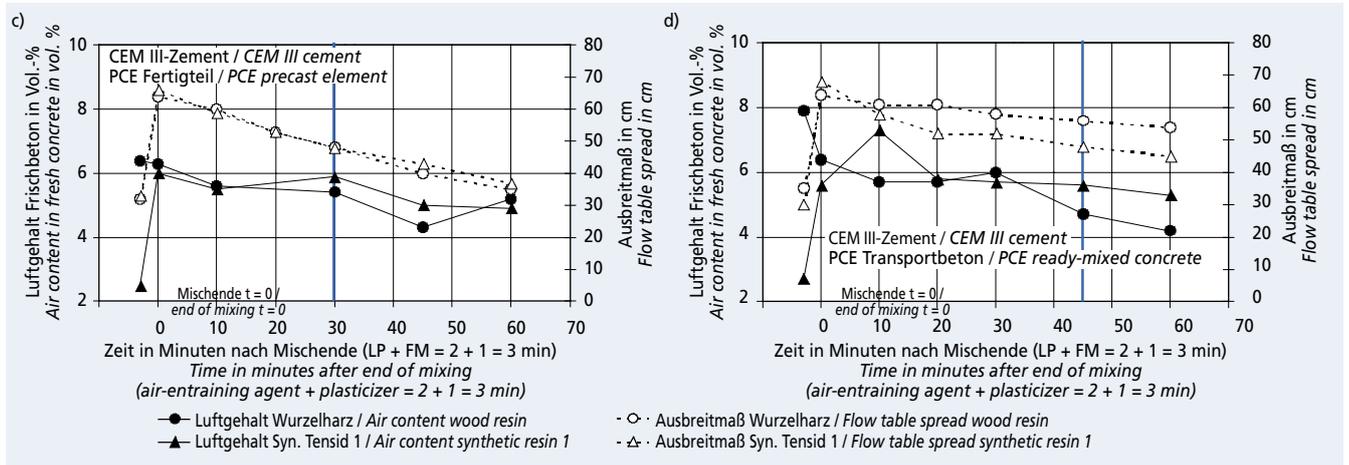


Bild 4: Zugabemengen Zusatzmittel: LP-Bildner (links) bzw. Fließmittel (rechts)
Figure 4: Quantities of admixture added: air-entraining agent (left) and plasticizer (right)



Bilder 5a und b: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften bei Verwendung des CEM I-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)
Figures 5a and b: Behaviour with time of the fresh concrete properties when using CEM I cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)



Bilder 5c und d: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften bei Verwendung des CEM III-Zements in Abhängigkeit vom LP-Bildner: links PCE Fertigteil (Hersteller 2) und rechts PCE Transportbeton (Hersteller 2)
Figures 5c and d: Behaviour with time of the fresh concrete properties when using CEM III cement relative to the air-entraining agent: left, PCE precast element (producer 2) and right, PCE ready-mixed concrete (producer 2)

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

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

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

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

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

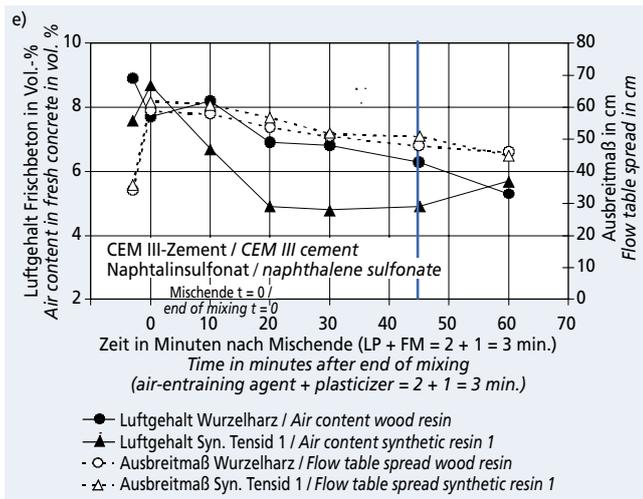


Bild 5e: Zeitlicher Verlauf der Frischbetoneigenschaften in Abhängigkeit vom LP-Bildner: Variante Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-basis (Hersteller 1) und CEM III-Zement

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

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

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

4.2.3 Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit von der Ausgangsstoffkombination

4.2.3.1 Luftporenkennwerte

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

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

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

4.2.2.1 Consistency

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

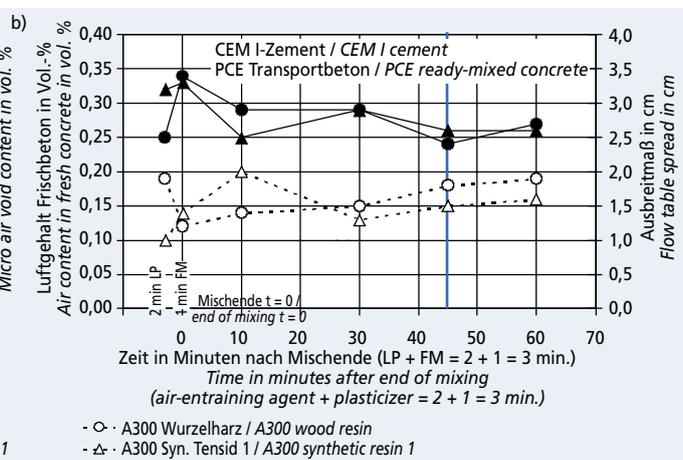
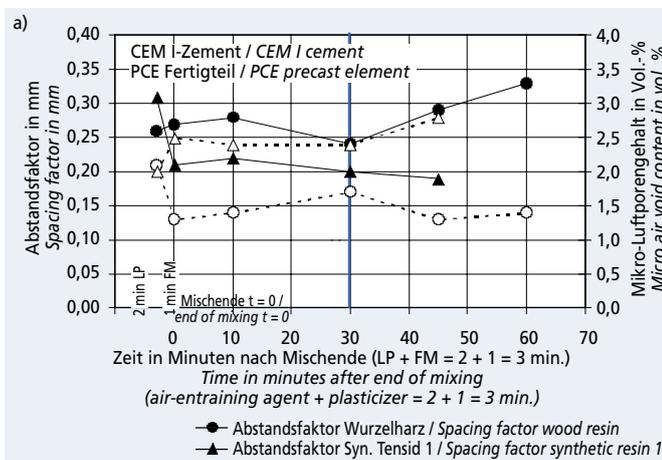
4.2.2.2 Air content

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

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

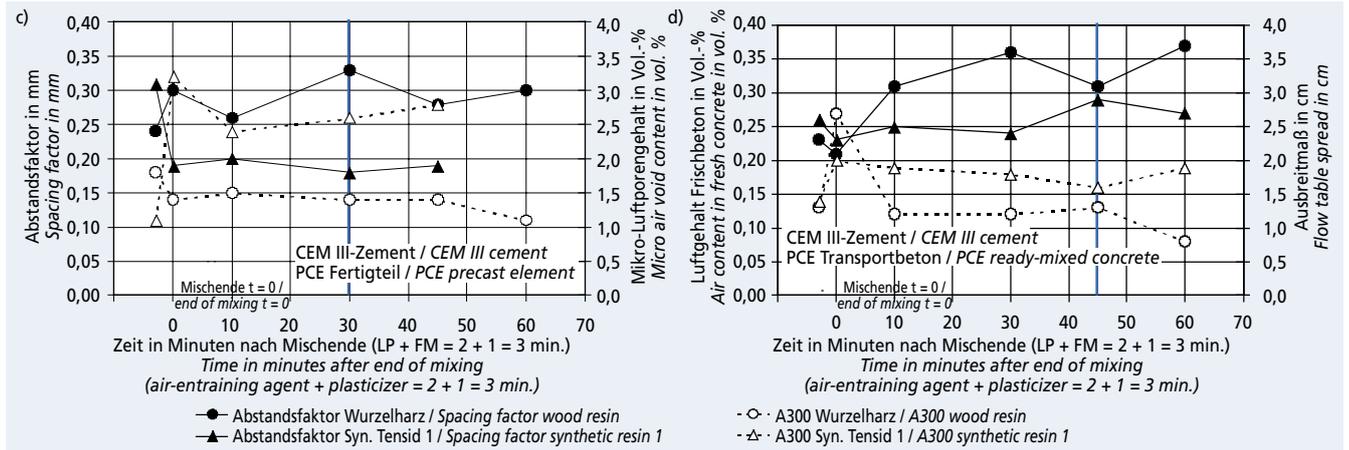
b) Plasticizer based on naphthalene sulfonate (Fig. 5e)

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



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

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



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

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

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

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

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

c) Vergleich der LP-Kennwerte mit den Anforderungen

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

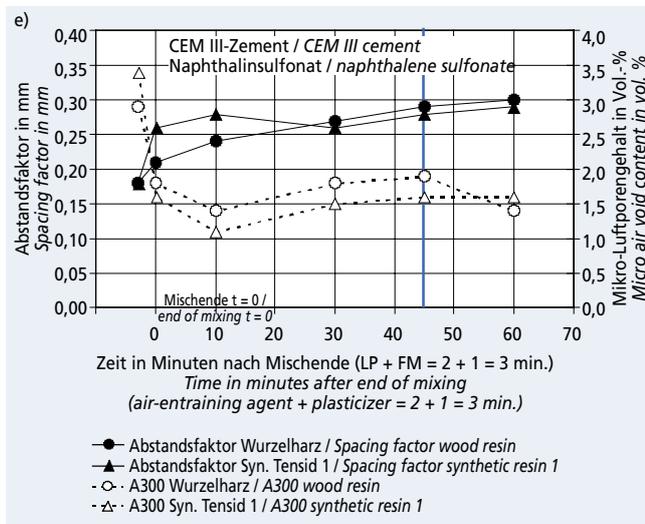


Bild 6e: Zeitlicher Verlauf der LP-Kennwerte in Abhängigkeit des LP-Bildners: Variante Fließmittel auf Naphthalinsulfonatbasis (Hersteller 1) und CEM III-Zement

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

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

4.2.3.1 Air void parameters

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

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

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

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

c) Comparison of the air void parameters with the requirements

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

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

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

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

4.2.3.2 Druckfestigkeit

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

5 Modellbildung

5.1 Allgemeines

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

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

4.2.3.2 Compressive strength

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

5 Modelling

5.1 General

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

5.2 Starting materials

5.2.1 Admixtures

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

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

5.2 Ausgangsstoffe

5.2.1 Zusatzmittel

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

5.2.2 Zement

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

5.3 Mischen des Betons

5.3.1 Zugabe des LP-Bildners

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

5.3.2 Zugabe des Fließmittels (erst LP, dann FM)

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

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

5.2.2 Cement

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

5.3 Mixing the concrete

5.3.1 Addition of the air-entraining agent

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

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

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

a) PCE-based plasticizers

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

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

a) Fließmittel auf PCE-Basis

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

■ LP-Bildner mit natürlicher Wirkstoffbasis

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

■ LP-Bildner mit synthetischer Wirkstoffbasis

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

b) Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis

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

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

c) Luftporensystem

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

– Air-entraining agents based on natural active substances

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

– Air-entraining agents based on synthetic active substances

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

b) Plasticizers based on naphthalene sulfonate

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

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

c) Air void system

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

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

5.3.3 Veränderung der Zugabereihenfolge der Zusatzmittel

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

5.3.4 Zugabe des Fließmittels auf der Baustelle

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

6 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

6.1 Zusammenfassung

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

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

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

PCEs are often added directly at the concrete plant. Alongside the greater sensitivity of the PCEs this may possibly be a reason for the adverse effect on air void formation reported from practice.

5.3.3 Changing the sequence of adding the admixtures

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

5.3.4 Addition of the plasticizer on the construction site

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

6 Summary and practical recommendations

6.1. Summary

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

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

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

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

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

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

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

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

6.2 Empfehlungen für die Praxis

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

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

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

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

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

6.2 Practical recommendations

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

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

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

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

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

b) Zusatzmittelindustrie

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

c) Baumaschinenindustrie

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

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

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

b) Admixture industry

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

c) Construction machinery industry

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

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

Literatur / Literature

[1] Deutsche Bauchemie e.V.: Betonzusatzmittel und Umwelt. Sachstandsbericht Mai 1999

[2] Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P.: Chemical Admixtures for Concrete. 2nd Edition, E. & F. N. Spon, London 1986

[3] Eickschen, E.: Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 73, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 2009

[4] König, G.; Viet Tue, N.; Zink, M.: Hochleistungsbeton: Bemessung, Herstellung und Anwendung. Verlag Ernst und Sohn, Berlin 2001

[5] Rickert, J.: Zeta-Potenzial und Rheologie von Zementleimen – Einfluss von Fließmittel sowie Hüttensand und Kalkstein. beton 60 (2010) H. 7, S. 315–320, und H. 8, S. 363-365

[6] Spanka, G.; Grube H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. Beton 45 (1995) H. 11, S. 802–808 und H. 12, S. 876–881

[7] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004

[8] Pigeon, M.; Plante, P.; Pleau, R.; Banthia, N.: Influence of soluble alkalis on the production and stability of the air-void system in superplasticized and non-superplasticized concrete. ACI Materials Journal 89 (1992), S. 24–31

[9] Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beton 45 (1995) H. 10, S. 724–730

[10] Herstellen von Luftporenbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 68 (2002) H. 1, S. 46–52

[11] Kottas, R.; Hilsdorf, H.: Der Einfluss der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, H. 274, Bonn 1979

[12] Bruere, G. M.: The relative importance of various physical and chemical factors on bubble characteristics in cement pastes. Australian Journal of Applied Science 12 (1961) H. 1, S. 78–86