

Einflüsse auf die Luftporenbildung in Straßenbeton

Factors affecting the formation of air voids in road concrete

Übersicht

Schäden infolge eines Frost-Tausalz-Angriffs treten praktisch nicht mehr auf, seitdem Betone für Fahrbahndecken künstlich eingeführte Luftporen enthalten. Entsprechende Regelungen für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand sind im Vorschriftenwerk festgelegt und haben sich in der Vergangenheit bewährt. In den letzten Jahren wurde bei einigen Betondeckenlosen insbesondere bei hohen Frischbetontemperaturen allerdings ein stark erhöhter Luftporengehalt im Festbeton festgestellt. Um die Ursache für diesen überhöhten Gehalt zu ermitteln, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Untersuchungen an Straßenbetonen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine wesentliche Erhöhung des Luftgehalts nur auftreten kann, wenn der Luftporenbildner im Frischbeton infolge einer zu kurzen Mischzeit bei der Herstellung nicht ausreichend aufgeschlossen und aktiviert wurde. Wird bei der Herstellung der Decke dann nachträglich Mischenergie in den Frischbeton eingeführt, kann der Luftgehalt ansteigen. Um bei zukünftigen Betonherstellungen eine stärkere Luftporenbildung beim Einbau des Betons zu vermeiden, werden Empfehlungen für die Praxis gegeben.

Abstract

Damage as a result of attack by freeze-thaw with de-icing salt has practically ceased since concretes for carriageway pavements have contained artificially introduced air voids. Respective specifications for composition and production of concrete with high resistance to freeze-thaw with de-icing salt have been fixed in the regulations and have been proved successful in the past. However, a greatly increased air void content in the hardened concrete has been found in recent years in some contract sections of concrete pavement, especially with high fresh concrete temperatures. Investigations were carried out at the Research Institute of the Cement Industry on road concretes in order to determine the reason for this excessively high content. The test results show that a substantial increase in air content can only occur if the air-entraining agent in the fresh concrete is not adequately broken down during production, due to too short a mixing time, and has therefore been insufficiently activated. The air content can then rise if mixing energy is introduced into the fresh concrete later during production of the pavement. Practical recommendations for future concrete production are given to avoid excessive air void formation during the placement of concrete.

1 Einleitung

Fahrbahndeckenbeton wird im Winter mit Tausalz beaufschlagt und muss daher einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen. Grundvoraussetzung hierfür ist ein ausreichend dichter Zementstein, die Verwendung einer Gesteinskörnung mit hohem Frostwiderstand und darüber hinaus die Zugabe eines Luftporenbildners, der einen ausreichenden Gehalt an kleinen Luftporen im Beton erzeugt. Bei einzelnen Straßenbaustellen ist in den letzten Jahren insbesondere bei hohen Frischbetontemperaturen eine ungewöhnliche Luftporenbildung beobachtet worden. Im Vergleich zum Frischbeton wurde im Festbeton ein stark erhöhter Luftporengehalt festgestellt. Um die Ursachen für diese nachträgliche Luftporenbildung zu ermitteln, hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie mit finanzieller Unterstützung des Verbands der Deutschen Bauchemie und des Bundesministers für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW) umfangreiche Untersuchungen durchgeführt [1, 2].

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Anwendung von Luftporenbildnern

Das wichtigste Anwendungsfeld von Luftporenbildnern ist die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit des erhärteten Betons gegen den Frost- bzw. Frost-Tausalzangriff. Über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, den Zusatz von Luftporenbildnern und die Einflüsse auf die Luftporenbildung liegen zahlreiche Forschungsergebnisse vor [3 bis 12] und haben Eingang in das Vorschriftenwerk gefunden [13, 14]. Fahrbahndeckenbeton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand nach ZTV-Beton-StB muss danach einen ausreichend dichten Zementstein ($w/z \leq 0,50$) aufweisen, unter Verwendung einer Gesteinskörnung mit hohem Frostwiderstand

1 Introduction

Carriageway pavement concrete is treated with de-icing salt in winter and must therefore have a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt. The basic preconditions for this are a sufficiently impermeable hardened cement paste and the use of an aggregate with high freeze-thaw resistance as well as the addition of an air-entraining agent that generates an adequate content of small air voids in the concrete. Unusual air void formations have been observed at individual road building sites in recent years, especially with high fresh concrete temperatures. A greatly increased air content was observed in the hardened concrete when compared with the fresh concrete. The Research Institute of the Cement Industry with financial support from the Association of German Construction Chemistry and the BMVBW (Federal Ministry for Traffic, Construction and Housing) has carried out extensive investigations in order to determine the reasons for this subsequent formation of air voids [1, 2].

2 Current state of knowledge

2.1 The use of air-entraining agents

The most important use of air-entraining agents is to increase the resistance of hardened concrete to attack by freeze-thaw or by freeze-thaw with de-icing salt. There are numerous research results available about the resistance of concrete to freeze-thaw with de-icing salt, the addition of air-entraining agents and the factors affecting the formation of air voids [3 to 12], and these have also been incorporated in the regulations [13, 14]. Carriageway pavement concrete with high resistance to freeze-thaw with de-icing salt complying with ZTV Beton-StB (Detailed Technical Specifi-

hergestellt werden und darüber hinaus einen Luftporenbildner enthalten, der einen ausreichenden Gehalt an kleinen Mikro-Luftporen im Beton erzeugt. Die Luftporen dienen als Ausweichraum zum Abbau des beim Gefrieren der Porenflüssigkeit entstehenden Drucks. Der Gehalt an kleinen Poren wird mit der Bestimmung des Mikro-Luftporengehaltes (alle Poren bis zu 300 µm) und des Abstandsfaktors am Festbeton beurteilt [15].

Der Abstandsfaktor ist ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes des Zementsteins von der nächsten Luftpore. Der Gehalt an Mikro-Luftporen bis zu 300 µm Durchmesser muss danach mindestens 1,8 Vol.-% betragen und der Abstandsfaktor darf 0,20 mm nicht überschreiten [13, 14]. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass für den Nachweis eines ausreichenden Gehalts an kleinen Poren bei Verwendung eines geeigneten Luftporenbildners die Bestimmung des Gesamtluftgehalts am Frischbeton näherungsweise genügt. Dieser muss beispielsweise bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm mindestens 4,0 Vol.-% (Einzelwert) bzw. 4,5 Vol.-% (Mittelwert) betragen. Weiche Betone und Betone mit Verflüssigern oder Fließmitteln weisen bei gleichem Gesamtluftgehalt wie steife Betone einen geringeren Gehalt an kleinen Luftporen < 300 µm auf [7]. Für diese Betone sind daher i.A. um 1 % erhöhte Luftgehalte einzuhalten [13, 14].

Geeignete luftporenbildende Zusatzmittel verbessern aber nicht nur den Frost-Tausalz-Widerstand des Betons, sondern können auch andere Betoneigenschaften verändern. Da Luftporen die Zementleimenge erhöhen, kann die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert oder der Wasser- und gegebenenfalls auch der Mehlkorngehalt des Betons vermindert werden. Außerdem wird die Neigung zum Entmischen und das Wasserabsondern des Betons verringert. Im Festbeton führt das erhöhte Porenvolumen im Zementstein zu einer Verringerung der Festigkeit [14, 16, 17]. Infolge des erhöhten Zementsteingehalts kann das Schwinden beim Austrocknen etwas vergrößert werden [18].

2.2 Wirkungsweise von Luftporenbildnern

2.2.1 Rohstoffe

Luftporenbildner gehören zu den grenzflächenaktiven Substanzen, den so genannten Tensiden. Durch die Zugabe von Luftporenbildnern werden die beim Mischen des Betons entstehenden Luftblasen stabilisiert, sodass sie im erhärteten Beton als kugelige Luftporen verbleiben. LP-Bildner werden an den Grenzflächen zwischen Luft und Anmachwasser adsorbiert und setzen die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft herab. Die gemeinsame Charakteristik aller Tenside ist ihr hydrophob-hydrophiler Molekülaufbau. Der hydrophobe Molekülteil besteht aus einer unpolaren verzweigten oder unverzweigten Kohlenwasserstoffkette. Der hydrophile polare Teil kann aus einer oder mehreren Carboxyl-, Sulfat- oder Sulfonat-Gruppen bestehen [19].

Als Grundstoffe für Luftporenbildner haben sich Seifen aus natürlichen Harzen (natürliche LP-Bildner) oder synthetische nicht-ionische oder ionische Tenside bewährt [20]. Harzseifen werden im Wesentlichen aus Tallharzen, Balsamharzen (Kolophonium), Wurzelharzen und Derivaten dieser natürlichen Harze gewonnen. Das Harz wird meist mit Kali- bzw. Natronlauge in die entsprechenden Harzseifen überführt. Die Wurzelharze bestehen aus einer unpolaren Kohlenwasserstoff-Kette und der polaren Carboxylat-Gruppe COONa. Als eigentlicher Wirkstoff der Wurzelharze wird das Natriumsalz der Abietinsäure genannt [19, 21]. Mit zunehmenden Mangel an natürlichen Wurzelharzen und zur Verbesserung der Luftporenbildung wurden synthetische Luftporenbildner eingesetzt. Als Rohstoffe werden im Wesentlichen Alkylpolyglykolethersulfate und Alkylsulfate bzw. -sulfonate verwendet [19, 20, 21]. Luftporenbildner bestehen selten aus reinen Grundstoffen, sondern sind meistens Gemische verschiedener Ausgangsstoffe [20].

2.2.2 Luftporenbildung

Die im Frischbeton gelösten Luftporenbildnermoleküle lagern sich an die Luftblasen an, die durch das Mischen eingetragen werden. Der polare hydrophile Teil ist dem Wasser (bzw. Zementleim) zugewandt, während der langkettige hydrophobe Teil in die Luftblase hineinragt. Während des Mischvorgangs werden laufend neue

cations for Road Concrete) must have a sufficiently impermeable hardened cement paste ($w/c \leq 0.50$) and be produced using an aggregate with high freeze-thaw resistance and in addition contain an air-entraining agent that generates a sufficient content of small micro air voids in the concrete. The air voids act as an escape area to relieve the pressure produced when the pore liquid freezes. The content of small pores is assessed by determining the micro air void content (all pores up to 300 µm) and the spacing factor in the hardened concrete [15].

The spacing factor is a parameter derived from an idealized pore system for the distance of a point in the hardened cement paste from the nearest air void. According to this the content of micro air voids up to a diameter of 300 µm must be at least 1.8 vol.% and the spacing factor must not exceed 0.20 mm [13, 14]. Extensive investigations have shown that determination of the total air content in the fresh concrete is adequate as an approximation for demonstrating an adequate content of small pores when using a suitable air-entraining agent. For a maximum particle size of the aggregate of 16 mm, for example, this must be at least 4.0 vol.% (single value) and 4.5 vol.% (average value). For the same total air content soft concretes and concretes with superplasticizers or plasticizers have a lower content of small air pores < 300 µm than stiff concretes [7]. For these concretes it is therefore generally necessary to maintain a 1% higher air content [13, 14].

However, suitable air-entraining additives not only improve the resistance of the concrete to freeze-thaw with de-icing salt but can also change other concrete properties. Air voids increase the quantity of cement paste, so the workability of the fresh concrete can be improved or the water content, and possibly also the powder content of the concrete, can be reduced. The tendency to segregation and bleeding of the concrete is also reduced. In the hardened concrete the increased pore volume in the hardened cement paste leads to a reduction in strength [14, 16, 17]. The shrinkage on drying can be somewhat increased as a result of the increased content of hardened cement paste [18].

2.2 Mode of action of air-entraining agents

2.2.1 Raw materials

Air-entraining agents belong to the group of surface-active substances, the so-called tensides. The addition of air-entraining agents stabilizes the air bubbles produced during the mixing of the concrete with the result that they remain in the hardened concrete as spherical air voids. Air-entraining agents are adsorbed at the interfaces between air and mixing water and reduce the surface tension between water and air. The common characteristic of all tensides is their hydrophobic-hydrophilic molecular structure. The hydrophobic part of the molecule consists of a non-polar branched or unbranched hydrocarbon chain. The hydrophilic polar part can consist of one or more carboxyl, sulfate or sulfonate groups [19].

Soaps made from natural resins (natural air-entraining agents) or synthetic non-ionic or ionic tensides have proved successful as the basic materials for air-entraining agents [20]. Resin soaps are obtained mainly from tall resins, balsam resins (colophonium), wood resins and derivatives of these in natural resins. The resin is usually converted into the corresponding resin soap with potassium or sodium hydroxide. The wood resins consist of a non-polar hydrocarbon chain and the polar COONa carboxylate group. The sodium salt of abietic acid is said to be the actual active ingredient of the wood resins [19, 21]. Synthetic air-entraining agents have been used due to the increasing shortage of natural wood resins and to improve the formation of air voids. Alkylpolyglycol ether sulfates and alkyl sulfates or sulfonates are generally used as the raw materials [19, 20, 21]. Air-entraining agents rarely consist of pure basic materials and are usually mixtures of different primary materials [20].

2.2.2 Air void formation

The molecules of air-entraining agents dissolved in the fresh concrete build up at the air bubbles that are introduced by the mixing process. The polar, hydrophilic, part faces towards the water (or cement paste) while the long-chain, hydrophobic, part projects into the air bubble. New air pores are stabilized continuously during

Luftporen stabilisiert, bis der LP-Bildner verbraucht ist. Die Konzentration des im Frischbeton gelösten LP-Bildners kann durch Ausfällung oder Sorption an Feststoffen (Zement und Gesteinskörnungen) verringert werden. Eine Luftporenbildung ist nur möglich, wenn ein ausreichender Rest des LP-Bildners in Lösung verbleibt, um die während des Mischens des Betons eingeführte Luft zu stabilisieren [19]. Bei einigen Luftporenbildnern wird durch die Ausscheidung/Ausfällung von Calciumsalzen an den Grenzflächen der Luftporen deren Stabilität weiter verbessert [19, 22, 23].

2.3 Einflüsse auf die Luftporenbildung

Die durch den Luftporenbildner in den Beton eingeführten Luftporen sind in ihrer Menge und Porengrößenverteilung von der chemischen Zusammensetzung und Zugabemenge des verwendeten Zusatzmittels abhängig. Darüber hinaus wird die Wirksamkeit der LP-Bildner und damit die Luftporenbildung von zahlreichen anderen Faktoren wie z.B. den Ausgangsstoffen, der Betonzusammensetzung, der Betonherstellung und der Konsistenz des Betons beeinflusst [14]. Ebenfalls können unterschiedliche Frischbetontemperaturen [12] oder eine Kombination mit anderen Zusatzmitteln [7] zu veränderten Luftporengehalten und Luftporengrößenverteilungen führen.

So nimmt die erforderliche Zusatzmittelmenge zur Erzielung eines bestimmten Luftporengehalts mit erhöhtem Mehlkorn- bzw. Feinstsandgehalt (0/0,125 mm bzw. 0/0,250 mm) und abnehmendem w/z-Wert zu [10, 16]. Mehlfeine Zusatzstoffe können die Luftporenbildung behindern. Kohlenstoff, z.B. in der Flugasche, vermindert den Luftporengehalt [23, 24]. Ein geringerer Zementgehalt und Zemente mit geringer Mahlfeinheit [17, 25] oder hohem Alkaligehalt [26] erleichtern die Luftporenbildung. Die Verwendung von Hochofenzement oder Flugaschezement anstatt von Portlandzement erschwert die Luftporenbildung [17, 25]. Einen deutlichen Einfluss hat auch das Mischen des Betons. Eine höhere Mischintensität oder eine längere Mischzeit erhöhen den Luftporengehalt. Bei einer zu langen Mischzeit kann der Luftporengehalt durch das Austreiben einzelner größerer Luftporen wieder abfallen. Außerdem vermindert sich der Luftporengehalt bei gleichbleibender LP-Bildner-Zugabemenge mit steigender Frischbetontemperatur [12, 25] und steiferer Konsistenz [10, 11, 16].

Die Zugabemenge des Luftporenbildners wird in der Eigenschaftsprüfung festgelegt und ggf. während der Bauausführung an die baupraktischen Verhältnisse angepasst. Die Anforderungen an den Luftgehalt des Frischbetons und die Luftporenkennwerte sind in den Straßenbauvorschriften [13, 14] festgelegt. Die Luftporenbildner selbst müssen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) aufweisen.

3 Ziel und Umfang der Versuche

An Luftporenbetonen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen sollte untersucht werden, inwieweit unter baupraktischen Bedingungen die Wirkstoffart des Luftporenbildners, die Frischbetontemperatur oder die Betonzusammensetzung, insbesondere verschiedene Sieblinien, zu einer Änderung des Luftgehalts oder der Luftporengrößenverteilung führen können. Aus den Versuchsergebnissen sollten Empfehlungen für die Praxis abgeleitet werden, um bei der Herstellung von Luftporenbeton einen überhöhten Luftgehalt zu vermeiden.

Zunächst wurde an einer Betonzusammensetzung untersucht, inwieweit die Art und Zugabemenge der Luftporenbildner und die Mischintensität einen Einfluss auf die Luftporenbildung des Betons haben. Da vermutet wurde, dass die Wirkstoffart des Luftporenbildners die Luftporenbildung beeinflusst, wurden sechs handelsübliche Luftporenbildner-Konzentrate mit natürlicher bzw. mit synthetischer Wirkstoffbasis verwendet. Die Zugabemenge der sechs Luftporenbildner wurde in Vorversuchen so ausgewählt, dass der Luftgehalt des Frischbetons nach einer Mischzeit von 2 Minuten bei der gewählten Frischbetontemperatur rd. 5 Vol.-% betrug. Anschließend wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit der im Vorversuch ermittelten und einer demgegenüber doppelten Zugabemenge bestimmt. Danach wurden zwei Luftporenbildner mit möglichst typischem Verhalten ausgewählt und der Einfluss des Zements, der Frischbetontemperatur, des Feinstsand-

the mixing process until the air-entraining agent is consumed. The concentration of the air-entraining agents dissolved in the fresh concrete may be reduced by precipitation or sorption on solids (cement and aggregate particles). Air void formation is possible only if a sufficient residue of the air-entraining agent remains in solution to stabilize the air introduced during the mixing of the concrete [19]. With some air-entraining agents the stability is further improved by the precipitation/deposition of calcium salts at the interfaces of the air voids [19, 22, 23].

2.3 Factors affecting air void formation

The quantity and size distribution of the air voids introduced into the concrete by the air-entraining agents are dependent on the chemical composition and quantity of the additive used. In addition to this, the effectiveness of the air-entraining agent, and hence of the air void formation, is also influenced by numerous other factors, such as the starting materials, the concrete composition, the concrete production and the consistency of the concrete [14]. Different fresh concrete temperatures [12] or a combination with other admixtures [7] can also lead to altered air void contents and air void size distributions.

For example, the quantity of admixture needed to achieve a certain air void content increases with increased powder or fine sand content (0/0.125 mm and 0/0.250 mm respectively) and with decreasing w/c value [10, 16]. Ultrafine admixtures can hinder the formation of air voids. Carbon in the fly ash, for example, reduces the air void content [23, 24]. A lower cement content and cements with low fineness [17, 25] or high alkali content [26] assist the formation of air voids. The use of blastfurnace cement or fly ash cement instead of Portland cement makes air void formation more difficult [17, 25]. The mixing of the concrete also has a significant influence. A higher mixing intensity or a longer mixing time raises the air void content. With an excessively long mixing time the air void content can drop again due to the expulsion of individual large air voids. For the same level of addition of air-entraining agent the air void content also falls with rising fresh concrete temperature [12, 25] and stiffer consistency [10, 11, 16].

The quantity of air-entraining agent to be added is established in the suitability test and if necessary adjusted during the construction work to suit the actual site conditions. The requirements for the air content of the fresh concrete and the air void parameters are laid down in the road construction regulations [13, 14]. The air-entraining agent itself must have general building inspectorate approval from the DIBt (German Institute for Construction Technology).

3 Aim and extent of the tests

The intention was to examine air-entrained concretes with different compositions to find the extent to which the type of active ingredient in the air-entraining agent, the fresh concrete temperature and the concrete composition, especially different grading curves, can lead to a change in the air content or in the air void size distribution under practical site conditions. Practical recommendations were to be derived from the test results in order to avoid excessive air content when producing air-entrained concrete.

Initially, a concrete composition was examined to find the extent to which the type and quantity of air-entraining agent added and the mixing intensity can affect the air void formation in the concrete. It was assumed that the nature of the active ingredient in the air-entraining agent influences the air void formation so six normal commercial air-entraining agent concentrates based on natural or synthetic active ingredients were used. The quantities of the six air-entraining agents added were chosen in preliminary trials so that after a mixing time of 2 minutes the air content of the fresh concrete was about 5 vol.% at the chosen fresh concrete temperature. The air void formation was then determined as a function of the mixing time using the quantity determined in the preliminary trial and with double this quantity. Two air-entraining agents with the most typical behaviour patterns were then chosen and the influence of the cement, the fresh concrete temperature, the fine sand content, the w/c value and the superplasticizer addition on the air void formation was examined. The 28-day compressive strength

gehalts, des w/z-Werts und der Fließmittelzugabe auf die Luftporenbildung untersucht. Am Festbeton wurden außerdem die 28-Tage-Druckfestigkeit und an ausgewählten Betonen die Luftporenkennwerte ermittelt.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

Als Ausgangsstoffe wurden verwendet:

a) Luftporenbildner

Es wurden jeweils drei Luftporenbildner-Konzentrate mit synthetischer (Tenside: S1, S2, S3) und mit natürlicher (Wurzelharze: N1, N2, N3) Wirkstoffbasis eingesetzt (Tafel 1).

b) Zement

Es wurden drei Zemente CEM I 32,5 R der Werke A, B und C verwendet. Von dem in der Mehrzahl der Versuche eingesetzten Zement des Werks B mussten drei Lieferchargen B1, B2 und B3 beschafft werden. Außerdem wurden zwei CEM II-Zemente (CEM II/A-LL 32,5 R des Werks A und CEM II/B-S 32,5 R des Werks B) verwendet. Der Klinker des CEM II/B-S entsprach dem Klinker des Portlandzements des Werks B aus der dritten Liefercharge (B3) und der Klinker des CEM II/A-LL dem Klinker des Portlandzements des Werks A. Alle Zemente entsprachen den Anforderungen der ZTV Beton-StB. Wichtige physikalische und chemische Kennwerte sind in Tafel 2 zusammengestellt.

c) Gesteinskörnung

Es wurde Rheinkiesand der Korngruppen 0/2, 1/2, 2/8 und 8/16 aus dem Bereich Düsseldorf sowie Quarzmehl 0/0,2 aus dem Bereich Köln eingesetzt. Die Dichte der Gesteinskörnungen betrug 2,60 kg/dm³. Aus den Korngruppen 0/2, 1/2 und dem Quarzmehl wurden durch Variation der Quarzmehlzugabe drei Laborsande 0/2 mit unterschiedlichen Feinstsandanteilen zusammengesetzt. Zusätzlich wurde ein feinteilerner Natursand aus einer Kiesgrube in Sachsen verwendet.

d) Wasser

Das Wasser wurde aus dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf entnommen.

e) Fließmittel

Zur Vermeidung von Wechselwirkungen wurde bei den Hauptversuchen kein Fließmittel verwendet. In orientierenden Zusatzversuchen wurde ein Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat eingesetzt.

4.2 Betonzusammensetzung

Der Standardbeton wies einen Zementgehalt von 350 kg/m³ Portlandzement CEM I 32,5 R (Werk B), einen w/z-Wert von 0,45 und eine Frischbetontemperatur von 20 °C auf. Das Korngemisch

was also measured on the hardened concrete as well as the air void parameters of selected concretes.

4 Experimental procedure

4.1 Starting materials

The starting materials used were:

a) Air-entraining agent

Three air-entraining agent concentrates based on synthetic active ingredients (tensides: S1, S2, S3) and three based on natural active ingredients (wood resins: N1, N2, N3) were used (Table 1).

b) Cement

Three CEM I 32,5 R cements from works A, B and C were used. Three delivery batches B1, B2 and B3 had to be obtained from works B for the cement used in the majority of the trials. Two CEM II cements (CEM II/A-LL 32,5 R from works A and CEM II/B-S 32,5 R from works B) were also used. The clinker for the CEM II/B-S cement corresponded to the clinker for the Portland cement from works B from the third delivery batch (B3) and the clinker for the CEM II/A-LL cement corresponded to the clinker for the Portland cement from works A. All cements met the requirements of ZTV Beton-StB. The important physical and chemical parameters are listed in Table 2.

c) Aggregate

Rhine sand and gravel of the 0/2, 1/2, 2/8 and 8/16 size groups from the Düsseldorf area and 0/0.2 quartz meal from the Cologne area were used. The aggregates had a density of 2.60 kg/dm³. Three 0/2 laboratories sands with different proportions of fine sand were made up from the 0/2 and 1/2 size groups and the quartz meal. A low-fines natural sand from a gravel pit in Saxony was also used.

d) Water

The water was taken from the mains supply for the town of Düsseldorf.

e) Superplasticizers

No superplasticizers were used in the main trials in order to avoid any interactions. A superplasticizer based on melamine sulfonate was used in some additional preliminary investigative trials.

4.2 Concrete composition

The standard concrete had a cement content of 350 kg/m³ of CEM I 32,5 R Portland cement (works B), a w/c ratio of 0.45 and a fresh concrete temperature of 20 °C. The aggregate consisted of 0/16 Rhine sand and gravel and 0/0.2 quartz meal (grading curve 3 with 92 kg/m³ fine sand content, Table 3). The aggregate content was 1767 kg/m³ and the proportion of 0/2 sand was 34 vol.%. The quantity of air-entraining agent added was established in preliminary trials so that for a mixing time of 2 minutes and a fresh concrete temperature of 20 °C the air content of the fresh concrete was (5 ± 0.5) vol.% (for quantities added see Table 4, mixes M1 to M6).

The two air-entraining agents N1 and S2 with the most typical behaviour patterns were chosen from the three synthetic and three natural air-entraining agents in order to investigate the influence of different parameters on the air void formation. Using these air-entraining agents (for quantities of N1 air-entraining agent added, mixes 7a to 21a, and of S2, mixes 7b to 21b, see Table 4) the following parameters were varied:

Cement

CEM I 32,5 R from works A, B (B2 or B3), C (M11, M9, M18, M12) and CEM II/B-S 32,5 R from works B (M15) and CEM II/A-LL 32,5 R from works A (M16).

Fresh concrete temperature

10 °C, 20 °C, 30 °C (M13, M9, M14)

Grading curves

The fine sand content was varied by using natural sand (grading curve 1, Table 3) and sands made up in the laboratory with-out and with small average and high proportions of quartz meal (grading curves 2 to 4, Table 3). The levels of fine sand

Tafel 1: Wirkstoffe (Herstellerangaben) und Feststoffgehalte der Luftporenbildner

Table 1: Active ingredients (manufacturers information) and solid contents of the air-entraining agents

Bezeichnung Designation	Feststoffgehalt [M.-%] Solid content [mass %]	Wirkstoffe Active ingredients	
N1	21,7	Vinsolharz / vinsol resin	natürlich natural
N2	1,4	Vinsolharz / vinsol resin	
N3	17,0	Naturharzseife natural resin soap	
S1	11,1	- Laurylsulfat lauryl sulfate - Sulfosuccinat sulfosuccinate	synthetisch synthetic
S2	0,6	Tensid-Zubereitung tenside preparation	
S3	6,4	- anionisches Tensid anionic tenside - nichtionisches Tensid non-ionic tenside	

Tafel 2: Physikalische und chemische Eigenschaften der verwendeten Zemente der Werke A, B und C
Table 2: Physical and chemical properties of the cements from works A, B and C

Kennwert Property		Zement CEM I 32,5 R aus Werk Cement CEM I 32,5 R from work					Zement CEM II 32,5 R	
		A	B1 ²⁾	B2 ²⁾	B3 ²⁾	C	A-LL Werk A	B-S Werk B
Erstarrungsbeginn Initial set	min	180	195	190	210	200	225	230
Wasseranspruch Water demand	%	25,0	27,0	26,0	26,0	28,0	24,0	26,0
Spez. Oberfläche Specific surface	cm ² /g	2 890	3 360	3 300	3 240	3 420	3 730	3 100
Druckfestigkeit / Compressive strength								
2 d	N/mm ²	21,0	25,7	21,6	24,3	25,9	18,9	14,2
28 d	N/mm ²	50,6	49,0	45,3	48,9	50,3	44,2	46,1
Chemische Zusammensetzung ¹⁾ / Chemical composition ¹⁾								
K ₂ O	M.-%	0,62	0,96	0,94	0,93	1,19	0,55	0,86
Na ₂ O	M.-%	0,07	0,14	0,15	0,13	0,22	0,12	0,18
Na ₂ O-Äquivalent	M.-%	0,47	0,78	0,77	0,74	1,00	0,48	0,75

¹⁾ Angaben glühverlustfrei / Calculated free of loss on ignition

²⁾ Werk B, Charge 1, 2 und 3 / Work B, batch 1, 2 and 3

bestand aus Rheinkie sand 0/16 und Quarzmehl 0/0,2 (Sieblinie 3 mit 92 kg/m³ Feinstsandgehalt, Tafel 3). Der Gehalt an Gesteinskörnungen betrug 1767 kg/m³ und der Sandanteil 0/2 lag bei 34 Vol.-%. Die Zugabemenge der Luftporenbildner wurde in Vorversuchen so festgelegt, dass der Luftgehalt des Frischbetons bei einer Mischzeit von 2 Minuten und einer Frischbetontemperatur von 20 °C bei (5 ± 0,5) Vol.-% lag (Zugabemengen: Tafel 4, Mischungen M1 bis M6).

Um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Luftporenbildung zu untersuchen, wurden aus den drei synthetischen und den drei natürlichen LP-Bildnern die beiden Luftporenbildner N1 und S2 mit möglichst typischem Verhalten ausgewählt. Unter Verwendung dieser Luftporenbildner (Zugabemengen LP-Bildner N1: Mischungen 7a bis 21a und S2: Mischungen 7b bis 21b, s. Tafel 4) wurden folgende Parameter variiert:

Zement

CEM I 32,5 R der Werke A, B (B2 bzw. B3), C (M11, M9, M18, M12) sowie CEM II/B-S 32,5 R des Werks B (M15) und CEM II/A-LL 32,5 R des Werks A (M16).

Frischbetontemperatur

10 °C, 20 °C, 30 °C (M13, M9, M14)

Sieblinie

Variation des Feinstsandgehalts durch Verwendung von Natursand (Sieblinie 1, Tafel 3) bzw. von im Labor zusammengesetzten Sanden mit keinem, mittlerem und erhöhtem Quarzmehlanteil (Sieblinien 2 bis 4, Tafel 3). Die Feinstsandgehalte (0/0,25 mm) der Betone lagen bei 30 kg/m³, 53 kg/m³, 92 kg/m³ und 133 kg/m³ (M7, M8, M9, M10).

Wasserzementwert

0,40; 0,45 und 0,50 (M17, M18, M19)

Fließmittelzugabe

Der vergleichsweise steife Beton mit dem w/z-Wert von 0,40 (M17) sollte durch Fließmittelzugabe auf ein Verdichtungsmaß von rd. 1,15 eingestellt werden. Das Fließmittel wurde sofort mit dem LP-Bildner (M20) bzw. eine Minute nach der LP-Bildner-Zugabe (M21) zugegeben. Der Wassergehalt des Fließmittels wurde vom Zugabewasser abgezogen.

4.3 Herstellung, Lagerung und Prüfung der Betone

4.3.1 Vorversuch

a) Herstellung

In einem Vorversuch wurde die LP-Bildner-Zugabemenge jeder Mischung so eingestellt, dass bei einer Mischzeit von 2 Minuten und der gewählten Frischbetontemperatur (10 °C, 20 °C

(0/0,25 mm) in the concretes were 30 kg/m³, 53 kg/m³, 92 kg/m³ and 133 kg/m³ (M7, M8, M9, M10).

Water/cement ratio

0.40, 0.45 and 0.50 (M17, M18, M19)

Superplasticizer addition

The comparatively stiff concrete with a w/c ratio of 0.40 (M17) was adjusted to a compacting factor of about 1.15 by addition of superplasticizer. The superplasticizer was added either directly with the air-entraining agent (M 20) or one minute after addition of the air-entraining agent (M 21). The water content of the superplasticizer was subtracted from the mixing water.

4.3 Production, storage and testing of the concretes

4.3.1 Preliminary test

a) Production

In a preliminary test the quantity of air-entraining agent added to each of the mixes was adjusted so that for a mixing time of 2 minutes and the chosen fresh concrete temperature (10 °C, 20 °C or 30 °C) the air content of the fresh concrete was

Tafel 3: Sieblinien der Korngemische für die Betonherstellungen
Table 3: Grading curves of the aggregates used for concrete production

Sieblinie 0/16 Grading curve		Siebgröße in mm Sieve size										
Nr.	Sand	Feinstsandgehalt Fine sand content 0/0,25 [kg/m ³]	0,063	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	16	22
1	Natur-sand	30	0,2	1,3	1,7	11,7	26,1	33,9	40,3	68,7	98,2	100
2	Labor-sand 1	53	0,2	0,5	3,0	12,6	13,8	32,1	44,1	69,2	96,6	100
3	Labor-sand 2	92	1,0	2,1	5,2	14,1	20,8	32,4	44,1	69,2	96,6	100
4	Labor-sand 3	133	1,4	3,1	7,5	21,4	29,5	32,8	41,4	69,2	99,0	100

bzw. 30 °C) der Luftgehalt des Frischbetons ($5 \pm 0,5$) Vol.-% betrug. Zement und Gesteinskörnungen wurden in einem 200 l-Zwangsmischer 15 Sekunden trocken vorgemischt. Der LP-Bildner wurde unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Die Mischzeit nach Zugabe aller Bestandteile betrug 2 Minuten.

In orientierenden Versuchen wurde Fließmittel auf zwei unterschiedliche Arten zugegeben. Das Fließmittel wurde bei der ersten Zugabeart zeitgleich mit dem Zugabewasser, das bereits den LP-Bildner enthielt und bei der zweiten Zugabeart eine Minute nach Zugabe des LP-Bildners zugegeben. Bei beiden Varianten betrug die Gesamtmischzeit des Betons zwei Minuten. 10 Minuten nach der Herstellung wurden für die Festbetonprüfungen für jede Mischung in Stahlformen folgende Probekörper hergestellt:

- Drei Würfel (150 mm Kantenlänge) zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen
- Ein Würfel (150 mm Kantenlänge) zur Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton

Alle Probekörper und der Luftporentopf bzw. der Verdichtungskasten wurden auf dem Rütteltisch verdichtet.

b) Lagerung

Die für die Druckfestigkeitsprüfung hergestellten Probekörper wurden entsprechend DIN 1048 gelagert. Die für die Bestimmung der Luftporenkennwerte vorgesehenen Probekörper wurden nach dem Entformen (1 Tag) bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach im Klimaraum bei rd. 20 °C und rd. 65 % relativer Luftfeuchte bis zu dem Zeitpunkt gelagert, an dem aus den Würfeln die Scheiben für die Bestimmung der LP-Kennwerte am Festbeton entnommen wurden.

c) Prüfungen

Beim Frischbeton wurde jeweils 10 Minuten nach der Herstellung des Betons das Verdichtungsmaß sowie der Luftgehalt im Drucktopf entsprechend DIN 1048-1 bestimmt. Beim Festbeton wurde die Druckfestigkeit nach DIN 1048 an drei Würfeln mit 150 mm Kantenlänge im Alter von 28 Tagen geprüft. An ausgewählten Betonen wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton in Anlehnung an [15] bestimmt.

4.3.2 Luftporenbildung in Abhängigkeit von der Mischzeit

a) Herstellung

Der Luftporenbildner wurde in der im Vorversuch ermittelten „normalen“ (Tafel 4) bzw. mit erhöhter (doppelter) Zugabemenge unmittelbar vor dem Mischen des Betons dem Zugabewasser zugegeben. Nach Zugabe aller Bestandteile wurde der Beton 30 Sekunden gemischt, anschließend der Mischer kurz angehalten, Beton für die Prüfung des Luftgehalts mit dem Drucktopf entnommen und unmittelbar der Luftgehalt bestimmt. Sofort nach der Entnahme des Betons aus dem Mischer wurde der Restbeton weiter gemischt und die Prüfung des Luftgehalts nach unterschiedlichen Gesamtmischzeiten wiederholt. Für die Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton bei einfacher und doppelter Zugabemenge wurde nach einer Mischzeit von 30 Sekunden, 2 Minuten und 6 Minuten jeweils ein Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt (Lagerung siehe 4.3.1).

b) Prüfungen

Der Luftgehalt des Frischbetons wurde nach DIN 1048-1 nach Mischzeiten von 30 Sekunden, sowie 1, 2, 4, 6, 8, 10 und ggf. 15 Minuten bestimmt. Beim Festbeton wurden die Luftporenkennwerte an Würfeln bestimmt. Dafür wurden ausgewählte Mischungen verwendet, die nach Mischzeiten von 30 Sekunden, 2 Minuten bzw. 6 Minuten hergestellt worden waren (Prüfung siehe 4.3.1).

5 Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

5.1 Konsistenz und Druckfestigkeit der Betone

Im Rahmen der Vorversuche zur Einstellung der LP-Bildner-Zugabemengen wurde die Konsistenz mit dem Verdichtungskasten und die 28-Tage-Druckfestigkeit bestimmt.

a) Konsistenz

Das Verdichtungsmaß lag 10 Minuten nach der Herstellung zwischen 1,08 und 1,41 (Tafel 4). Durch den LP-Bildner be-

($5 \pm 0,5$) vol.%. The cement and aggregates were pre-mixed dry for 15 seconds in a 200 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 2 minutes.

In preliminary investigative tests the superplasticizer was added in two different ways. For the first type of addition the superplasticizer was added with the mixing water that already contained the air-entraining agent, and for the second type of addition it was added one minute after addition of the air-entraining agent. For both variants the total mixing time of the concrete was two minutes. 10 minutes after production the following test pieces were produced in steel moulds from each mix for the hardened concrete tests:

- Three cubes (150 mm edge length) for determining the compressive strength after 28 days
- One cube (150 mm edge length) for determining the air void parameters in the hardened concrete

All test pieces and the air void test vessel or the compaction box were compacted on the vibrating table.

b) Storage

The test pieces produced for the compressive strength test were stored in accordance with DIN 1048. After demoulding (1 day) the test pieces intended for determination of the air void parameters were stored under water until 7 days old and then in a climatic chamber at about 20 °C and about 65 % relative air humidity until slices were taken from the cubes to determine the air void parameters in the hardened concrete.

c) Tests

In each case the degree of compaction and the air content of the fresh concrete were determined in the compression box in accordance with DIN 1048-1 ten minutes after production of the concrete. For the hardened concrete the compressive strength as defined in DIN 1048 was tested on three cubes with 150 mm edge length at 28 days. The air void parameters in the hardened concrete were determined on selected concretes using the procedure in [15].

4.3.2 Air void formation as a function of mixing time

a) Production

The air-entraining agents were added to the mixing water immediately before mixing the concrete either in the “normal” quantity determined in the preliminary test (Table 4) or with increased (double) quantity. After addition of all constituents the concrete was mixed for 30 seconds, the mixer was then stopped briefly, concrete was removed for testing the air content with the pressure vessel and the air content was determined immediately. Directly after removal of the concrete from the mixer the rest of the concrete was mixed further and the testing of the air content was repeated after different total mixing times. One cube with edge length of 150 mm was produced after each of the mixing times of 30 seconds, 2 minutes and 6 minutes (see 4.3.1 for storage conditions) for determining the air void parameters in the hardened concrete with single and double addition quantities.

b) Testing

The air content of the fresh concrete was determined in accordance with DIN 1048-1 after mixing times of 30 seconds and 1, 2, 4, 6, 8, 10 and, where, necessary 15 minutes. The air void parameters in the cubes were determined for the hardened concrete. Selected mixes that had been produced after mixing times of 30 seconds, 2 minutes or 6 minutes (see 4.3.1 for testing) were chosen for this purpose.

5 Presentation and discussion of the test results

5.1 Consistency and compressive strength of the concretes

The consistencies were determined with compaction boxes and the 28-day compressive strengths were measured during the preliminary tests for setting the quantity of air-entraining agent to be added.

a) Consistency

10 min after production the degree of compaction lay between 1.08 and 1.41 (Table 4). There were no detectable differences

Tafel 4: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung (Zementgehalt 350 kg/m³)
Table 4: Results of fresh and hardened concrete tests as a function of mix composition (cement content 350 kg/m³)

Nr.	Zementart 32,5 R	Werk work	w/z	Feinstsand- gehalt Fine sand content [kg/m ³]	Frischbeton- temperatur Fresh concrete temperature [°C]	LP-Bildner Zugabemenge AEA addition		Luftporen- gehalt Air content [Vol.-%]		Verdichtungs- maß Degree of compaction [-]		28-Tage- Druckfestigkeit Compressive strength [N/mm ²]	
						[% v.z.]							
M1	CEM I	B1	0,45	92	20	N1: 0,054		4,8		1,32		50,6	
M2	CEM I	B1	0,45	92	20	N2: 0,046		5,2		1,29		46,4	
M3	CEM I	B1	0,45	92	20	N3: 0,056		5,0		1,33		48,2	
M4	CEM I	B1	0,45	92	20	S1: 0,036		4,9		1,26		46,7	
M5	CEM I	B1	0,45	92	20	S2: 0,039		4,8		1,28		47,7	
M6	CEM I	B1	0,45	92	20	S3: 0,058		4,6		1,31		48,6	
Mischungen M7a bis M21a: LP-Bildner N1 / Mixes M7a to M21a: air-entraining agent N1						N1		S2		N1		S2	
Mischungen M7b bis M21b: LP-Bildner S2 / Mixes M7b to M21b: air-entraining agent S2						N1		S2		N1		S2	
M7a/b	CEM I	B2	0,45	30	20	0,035	0,024	5,4	5,3	1,20	1,25	44,3	46,6
M8a/b	CEM I	B2	0,45	53	20	0,045	0,032	4,8	5,0	1,27	1,29	49,2	50,0
M9a/b	CEM I	B2	0,45	92	20	0,061	0,041	5,0	4,8	1,31	1,30	47,9	47,1
M10a/b	CEM I	B2	0,45	133	20	0,061	0,035	4,7	4,9	1,32	1,38	46,5	48,9
M11a/b	CEM I	A	0,45	92	20	0,042	0,025	4,9	5,0	1,24	1,31	47,9	49,2
M12a/b	CEM I	C	0,45	92	20	0,061	0,041	4,8	4,6	1,22	1,26	46,2	49,1
M13a/b	CEM I	B2	0,45	92	10	0,035	0,020	4,8	4,8	1,19	1,22	48,9	50,3
M14a/b	CEM I	B2	0,45	92	30	0,110	0,060	5,5	5,5	1,34	1,30	44,5	44,5
M15a/b	CEM II/B-S	B3	0,45	92	20	0,046	0,035	4,7	5,5	1,28	1,27	45,3	44,3
M16a/b	CEM II/A-LL	A	0,45	92	20	0,037	0,023	5,2	5,0	1,16	1,16	44,8	45,3
M17a/b	CEM I	B3	0,40	92	20	0,100	0,050	5,1	5,0	1,41	1,38	53,4	55,1
M18a/b	CEM I	B3	0,45	92	20	0,051	0,033	4,8	5,4	1,29	1,25	49,1	44,5
M19a/b	CEM I	B3	0,50	92	20	0,041	0,024	5,1	5,4	1,09	1,08	36,8	37,3
M20a/b ¹⁾	CEM I	B3	0,40	92	20	0,055	0,032	5,1	5,0	1,12	1,17	59,0	58,9
M21a/b ²⁾	CEM I	B3	0,40	92	20	0,100	0,040	5,0	5,0	1,11	1,10	57,8	58,5

¹⁾ Fließmittel-Zugabemenge bei sofortiger Zugabe / Addition of superplasticizer when starting mixing: 20a (N1): 4,2 % v.z., 20b (S2): 4,2 % v.z.

²⁾ Fließmittel-Zugabemenge nach einminütiger Mischzeit / Addition of superplasticizer after a mixing time of 1 minute: 21a (N1): 2,5 % v.z., 21b (S2): 2,8 % v.z.

dingte Unterschiede waren nicht erkennbar. Erwartungsgemäß stieg das Verdichtungsmaß mit

- erhöhtem Durchgang des Sands durch das 0,25-mm-Sieb und somit höherem Feinstsandgehalt des Betons (M7, M8, M9, M10)
- höherer Frischbetontemperatur (M13, M9, M14) und
- geringerem Leimgehalt und gleichzeitig steiferem Leim (geringerer w/z-Wert bei gleichbleibendem Zementgehalt: M17, M18, M19).

Im Vergleich zum entsprechenden Portlandzement-Beton verringerte sich das Verdichtungsmaß beim Beton mit Portlandkalksteinzement (M11 zu M16), während bei dem Beton mit hüttensandhaltigem Zement (M18 zu M15) kein nennenswerter Unterschied zum Portlandzement auftrat. Durch relativ hohe Fließmittelzugaben (3 M.-% bis 4 M.-% v.z., Tafel 4) konnte das Verdichtungsmaß der Betone mit dem Wasserzementwert von 0,40 von rd. 1,40 (M17) auf rd. 1,15 (M20, M21) reduziert werden. Am stärksten wurde die Konsistenz von der Frischbetontemperatur und dem Leimgehalt (w/z-Wert) beeinflusst.

b) Druckfestigkeit

Die 28-Tage-Druckfestigkeit der Betone (Tafel 4) lag bei dem Wasserzementwert von 0,45 zwischen rd. 44 N/mm² und 50 N/mm² und erfüllte damit die Anforderungen der ZTV Beton an einen Beton der Bauklasse SV. Die Druckfestigkeit wurde durch die Wirkstoffart des LP-Bildners oder eine Fließmittelzugabe (M20, M21) nicht nennenswert beeinflusst. Erwartungsgemäß stieg die Druckfestigkeit mit sinkendem Wasserzementwert.

caused by the air-entraining agents. As expected, the degree of compaction increased with:

- increased quantity of sand passing through the 0.25 mm screen and hence higher fine sand content in the concrete (M7, M8, M9, M10),
- higher fresh concrete temperature (M13, M9, M14), and
- lower paste content and at the same time stiffer paste (lower w/c ratio with constant cement content: M17, M18, M19).

When compared to the corresponding Portland cement concrete the concretes made with Portland limestone cement (M11 to M16) had lower degrees of compaction, while no appreciable difference appeared from the Portland cement with the concretes made with cement containing blastfurnace slag (M18 to M15). The degree of compaction of about 1.40 (M17) of the concretes with a water/cement ratio of 0.40 was reduced to about 1.15 (M20, M21) by relatively large additions of superplasticizers (3 wt.% to 4 wt.% relative to the cement, Table 4). The consistency was most strongly affected by the fresh concrete temperature and the paste content (w/c ratio).

b) Compressive strength

The 28-day compressive strengths of the concretes (Table 4) with a water/cement ratio of 0.45 lay between about 44 N/mm² and 50 N/mm² and therefore fulfilled the requirements of ZTV Beton for concretes of the SV construction class. The compressive strength was not appreciably affected by the type of active ingredient in the air-entraining agent or by addition of superplasticizers (M20, M21). As expected, the compressive strength rose with falling water/cement ratio.

5.2 Einfluss des Luftporenbildners auf die Luftporenbildung

5.2.1 Erforderliche Luftporenbildner-Zugabemenge

Die im Vorversuch ermittelte erforderliche Zugabemenge zur Erzielung des Luftgehalts von 5 Vol.-% betrug in Abhängigkeit des LP-Bildners zwischen 0,036 % und 0,058 % des Zementgewichts (Tafel 4). Ein Einfluss des Feststoffgehalts (Tafel 1: 0,6 M.-% bis 21,7 M.-%) bzw. der Wirkstoffart des LP-Bildners auf die Zugabemenge konnte nicht festgestellt werden.

5.2.2 Luftporenkennwerte

Die am Festbeton ermittelten Kennwerte sind in Abhängigkeit des LP-Bildners in Tafel 5 zusammengestellt und erfüllen die Anforderungen des Vorschriftenwerks. Die Abstandsfaktoren liegen zwischen 0,14 mm und 0,18 mm (Anforderung höchstens 0,20 mm); die Mikro-Luftporengehalte zwischen 2,1 Vol.-% und 2,6 Vol.-% (Anforderung mindestens 1,8 Vol.-%). Bezieht man den Anteil der Mikro-Luftporen auf den Gesamtluftgehalt, zeigt sich bei den LP-Bildnern mit synthetischer Wirkstoffbasis ein etwas höherer Anteil der Mikroluftporen am Gesamtluftgehalt (Tafel 5).

5.2.3 Mischzeitabhängige Luftporenbildung

Die Abhängigkeit der Luftporenbildung von der Mischzeit des Betons ist in Bild 1 für die Luftporenbildner mit natürlicher Wirkstoffbasis und in Bild 2 für die Luftporenbildner mit synthetischer Wirkstoffbasis dargestellt. Dabei wurde die im Vorversuch ermittelte normale und eine demgegenüber verdoppelte Zugabemenge verwendet.

Bei normaler Zugabemenge zeigten die Betone mit allen sechs Luftporenbildnern ein nahezu gleichartiges Verhalten. Der angestrebte Luftgehalt von rd. 5 % wurde nach einer Mischzeit von einer Minute erreicht. Mit zunehmender Mischzeit wurden z.T. vereinzelt Luftporen ausgetrieben, sodass der Luftgehalt geringfügig abfiel.

Bei doppelter Zugabemenge zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten. Bei Betonen mit den Luftporenbildnern N1 und N2 erhöhten sich die Luftgehalte nur um rd. 2 % auf rd. 7 %. Nach einer Mischzeit von max. rd. einer Minute änderte sich der Luftgehalt nicht mehr. Bei den Betonen mit den Luftporenbildnern N3, S1 und S3 stieg der Luftgehalt auf das zwei- bis dreifache und beim Beton mit dem Luftporenbildner S2 auf über das vierfache des Luftgehalts der normalen Zugabemenge an. Es waren deutlich längere Mischzeiten erforderlich, bis der gesamte Luftporenbildner aufgeschlossen war und sich ein konstanter Luftgehalt einstellte. Das Verhalten der Luftporenbildner konnte aber nicht systematisch einer bestimmten Wirkstoffart – synthetisch oder natürlich – zugeordnet werden.

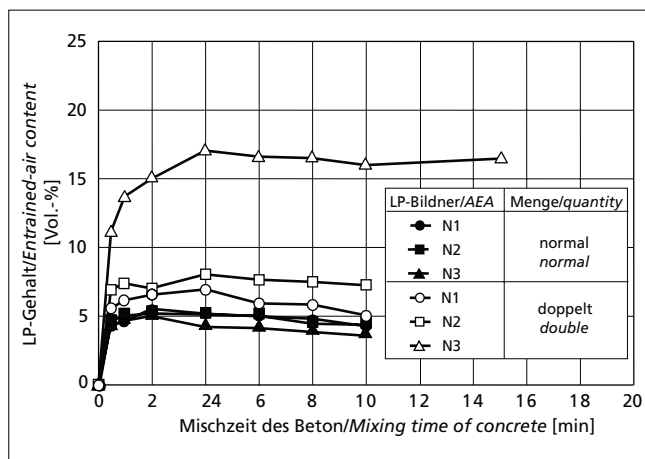


Bild 1: Entwicklung des Luftgehalts des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Zugabemenge der Luftporenbildner mit natürlichem Wirkstoff

Figure 1: Development of the air content of the fresh concrete as a function of the mixing time and quantity of air-entraining agent with natural active ingredient

Tafel 5: Luftporenkennwerte am Festbeton in Abhängigkeit vom LP-Bildner

Table 5: Air void parameters in the hardened concrete as a function of the air-entraining agent

LP-Bildner/Mischung AEA/Mixture	Luftporenkennwerte Air-void parameters			
	AF [mm]	L 300 [Vol.-%]	L _a [Vol.-%]	L 300/L _a ¹⁾ [-]
N1 (M1)	0,15	2,3	5,2	0,44
N2 (M2)	0,14	2,1	5,7	0,37
N3 (M3)	0,17	2,1	5,4	0,39
S1 (M4)	0,14	2,3	4,5	0,51
S2 (M5)	0,18	2,6	5,8	0,45
S3 (M6)	0,15	2,1	4,6	0,46

¹⁾ auf Luftgehalt bezogener Mikro-Luftporengehalt
Micro-air-void content in relation to total air content

5.2 Influence of the air-entraining agent on air void formation

5.2.1 Quantity of air-entraining agent required

Depending on the air-entraining agent the quantity, determined in the preliminary trial, that was needed to achieve an air content of 5 vol.% lay between 0.036 % and 0.058 % of the cement weight (Table 4). The solids content (Table 1: 0.6 wt.% to 21.7 wt.%) and the type of active ingredient in the air-entraining agent had no detectable influence on the quantity to be added.

5.2.2 Air void parameters

The parameters measured on the hardened concrete are listed in Table 5 as a function of the air-entraining agent and fulfil the requirements of the regulations. The spacing factors lie between 0.14 mm and 0.18 mm (requirement: not more than 0.20 mm) and the micro air void contents lie between 2.1 vol.% and 2.6 vol.% (requirement: at least 1.8 vol.%). When the proportion of micro air voids is related to the total air content the air-entraining agents based on synthetic active ingredients give a somewhat higher proportion of micro air voids in the total air content (Table 5).

5.2.3 Air void formation as a function of mixing time

The dependence of the formation of air voids on the mixing time of the concrete is shown in Figure 1 for the air-entraining agents based on natural active ingredients and in Figure 2 for the air-en-

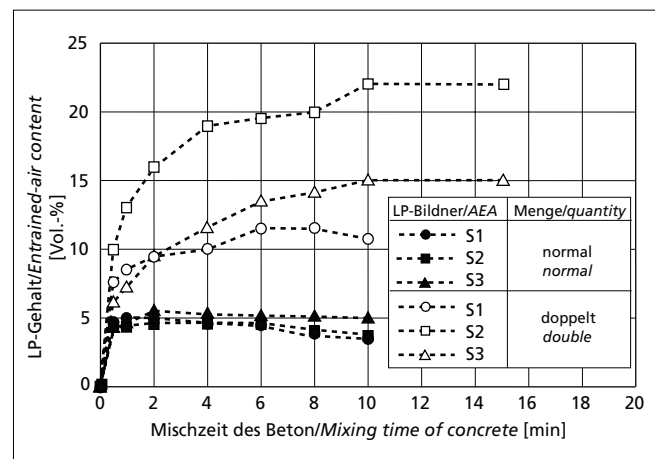


Bild 2: Entwicklung des Luftgehalts des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Zugabemenge der Luftporenbildner mit synthetischem Wirkstoff

Figure 2: Development of the air content of the fresh concrete as a function of the mixing time and quantity of air-entraining agent with synthetic active ingredient

5.3 Einfluss der Mischungszusammensetzung und der Frischbetontemperatur auf die Luftporenbildung

Im Folgenden wird der Einfluss von Zement, Sieblinie, w/z-Wert, Fließmittelzugabe und Frischbetontemperatur unter Berücksichtigung der Wirkstoffbasis des LP-Bildners untersucht. Um den Versuchsaufwand zu begrenzen, wurden zwei Luftporenbildner mit möglichst typischem Verhalten ausgewählt: Der Luftporenbildner N1 mit einem geringen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und der Luftporenbildner S2 mit einem starken Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge.

5.3.1 Erforderliche Luftporenbildner-Zugabemenge

Die erforderlichen LP-Bildner-Zugabemengen für einen Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% sind in Bild 3 in Abhängigkeit der untersuchten Parameter: Zement, Sand, Temperatur, w/z-Wert und Fließmittelzugabe dargestellt. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern, werden die Standardbetone (M9 bzw. M18) immer mitaufgeführt und erscheinen daher mehrmals. Obwohl die beiden LP-Bildner unterschiedliche Wirkstoffarten aufweisen, wirken sich die o.g. Parameter gleichartig auf die Veränderung der erforderlichen Zugabemengen aus. Die erforderliche Zugabemenge beider LP-Bildner musste gesteigert werden bei:

- erhöhtem Durchgang des Sands 0/2 durch das 0,25 mm-Sieb und somit höherem Feinstsandgehalt des Betons (M7, M8, M9, M10)
- höherer Frischbetontemperatur (M13, M9, M14)
- geringerem Leimgehalt und gleichzeitig steiferem Leim (geringerer w/z-Wert bei gleichbleibendem Zementgehalt: M17, M18, M19).

Bei den Betonen mit unterschiedlichen Portlandzementen (M11, M9, M18, M12) wurden unterschiedliche Zugabemengen festgestellt. Ob diese Unterschiede auf physikalische (z.B. Mahlfineinheit) oder chemische Kennwerte der Zemente zurückzuführen sind, kann wegen der geringen Anzahl der geprüften Zemente nicht angegeben werden. Die Verwendung von CEM II-Zement (M15, M16) anstelle von CEM I-Zement (M18, M11) hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Zugabemenge.

Betone mit steiferer Konsistenz erforderten wesentlich höhere Zugabemengen. Die Absenkung des w/z-Werts von 0,50 (M19) auf 0,40 (M17) bei gleichbleibendem Zementgehalt bewirkte eine

training agents based on synthetic active ingredients. The normal addition quantity determined in the preliminary trial and double this quantity were used.

For the normal addition quantity the concretes showed virtually the same behaviour with all six air-entraining agents. The requisite air content of about 5 % was reached after a mixing time of 1 minute. In some cases individual air voids were driven out with increasing mixing time so that the air content dropped slightly.

A different behaviour pattern occurred with double the addition quantity. With concretes made with air-entraining agents N1 and N2 the air void contents increased by only about 2 % to about 7 %. There was no further change in the air content after a mixing time of a maximum of about one minute. With the concretes made with the air-entraining agents N3, S1 and S3 the air content increased to two- to three-times, and with concrete made with the air-entraining agent S2 to over four-times, the air content obtained with the normal addition quantity. It was clear that longer mixing times were necessary before all the air-entraining agent was broken down and a constant air content was obtained. However, it was not possible to assign the behaviour patterns of the air-entraining agents systematically to a certain type of active ingredient – synthetic or natural.

5.3 Influence of mix composition and fresh concrete temperature on air void formation

The influence of the cement, grading curve, w/c ratio, superplasticizer addition and fresh concrete temperature is investigated below while taking the basic active ingredient of the air-entraining agent into account. Two air-entraining agents with the most typical behaviour patterns were chosen in order to limit the amount of testing: air-entraining agent N1 with a small rise in air content when double the quantity is used and air-entraining agent S2 with a sharp rise in the air content with double the quantity.

5.3.1 Required quantity of air-entraining agent

The quantities of air-entraining agents required to give an air content of about 5 vol.% are shown in Figure 3 as a function of the parameters investigated, namely cement, sand, temperature, w/c ratio and superplasticizer addition. To improve the general clarity the standard concretes (M9 and M18) are always included in the lists and therefore appear several times. Although the two air-entraining agents have different types of active ingredient the above-mentioned parameters have the same effect on the change of the quantity required. The quantity of the two air-entraining agents required had to be increased for:

- increased quantity of 0/2 sand passing through the 0.25 mm screen and therefore higher fine sand content of the concrete (M7, M8, M9, M10)
- higher fresh concrete temperature (M13, M9, M14)
- lower paste content and at the same time stiffer paste (lower w/c ratio for the same cement content: M17, M18, M19).

Different quantities were established for the concretes made with different Portland cements (M11, M9, M18, M12). Whether these differences are attributable to physical (e.g. fineness) or chemical parameters of the cements cannot be stated because of the small number of cements tested. The use of CEM II cement (M15, M16) instead of CEM I cement (M18, M11) had no appreciable influence on the quantity required.

Substantially higher quantities were required for concretes with stiffer consistencies. The reduction of the w/c ratio from 0.50 (M19) to 0.40 (M17) for the same cement content resulted in a reduction in the paste content and a stiffer consistency of the paste itself and required at least twice the quantity of air-entraining agent. The fresh concrete temperature had the greatest influence. A rise in the fresh concrete temperature from 10 °C (M13) to 30 °C (M14) required approximately three times the amount of air-entraining agent. An additional chemical effect on the temperature (interaction of air-entraining agent with hydration products that are produced to varying extents depending on the temperature) also has to be taken into account where appropriate.

A higher fine sand content also leads to a stiffer consistency. A high 0/0.25 mm fine sand content means that less interstitial space

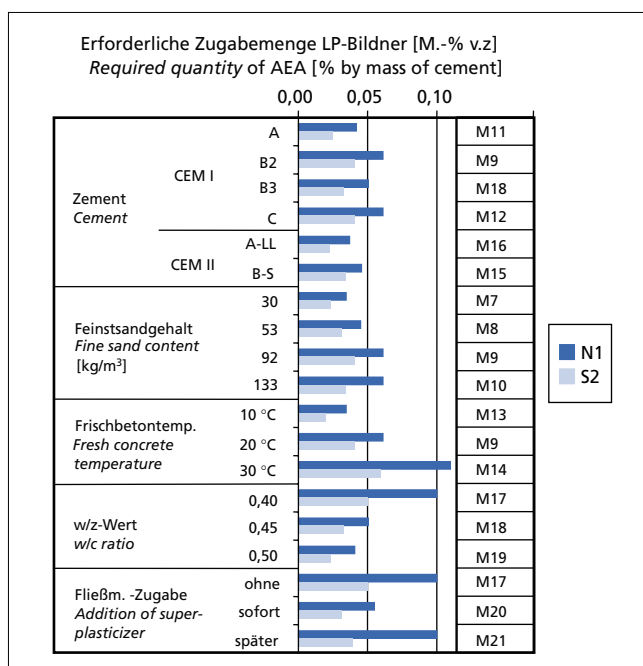


Bild 3: Zugabemenge der LP-Bildner N1 und S2 in Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung und der Frischbetontemperatur (Gesamtluftporengehalt rd. 5 Vol.-%)

Figure 3: Quantity of air-entraining agents N1 and S2 as a function of the mix composition and the fresh concrete temperature (total air-void content about 5 vol.-%)

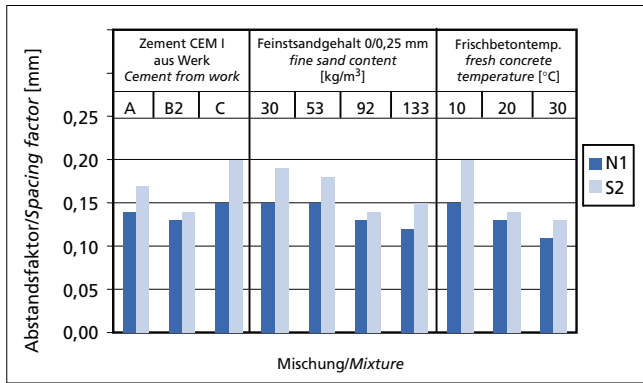


Bild 4: Abstandsfaktor in Abhängigkeit vom Zement, vom Feinstsandgehalt und von der Frischbetontemperatur bei Verwendung der Luftporenbildner N1 und S2 (Gesamtluftporengehalt rd. 5 Vol.-%)
Figure 4: Spacing factor as a function of the cement, fine sand content and of the fresh concrete temperature when using air-entraining agents N1 and S2 (total air-void content about 5 vol.-%)

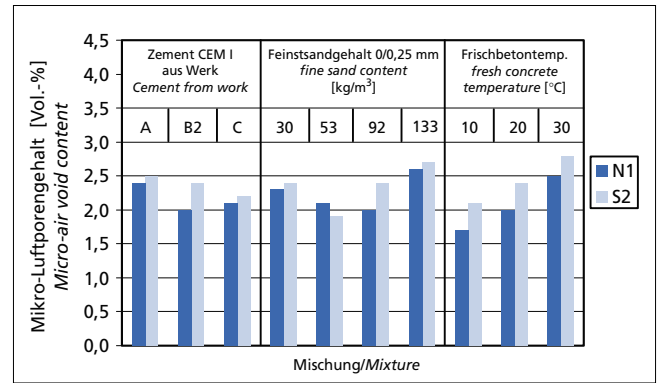


Bild 5: Mikro-Luftporengehalt in Abhängigkeit vom Zement, vom Feinstsandgehalt und von der Frischbetontemperatur bei Verwendung der Luftporenbildner N1 und S2 (Gesamtluftporengehalt rd. 5 Vol.-%)
Figure 5: Micro air-void content as a function of the cement, fine sand content and of the fresh concrete temperature when using air-entraining agents N1 and S2 (total air-void content about 5 vol.-%)

Verringerung des Leimgehalts und eine steifere Konsistenz des Leims selbst und erforderliche mindestens eine Verdoppelung der erforderlichen LP-Bildner-Zugabemenge. Den stärksten Einfluss hatte die Frischbetontemperatur. Ein Anstieg der Frischbetontemperatur von 10 °C (M13) auf 30 °C (M14) erforderte sogar ungefähr eine Verdreifachung der erforderlichen LP-Bildner-Zugabemenge. Bei der Temperatur muss gegebenenfalls ein zusätzlicher chemischer Einfluss (Zusammenwirken von LP-Bildner und temperaturabhängig unterschiedlich stark entstehender Hydratationsprodukte) berücksichtigt werden.

Ein höherer Feinstsandanteil führt ebenfalls zu einer steiferen Konsistenz. Bei einem hohen Feinstsandgehalt 0/0,25 mm sind zudem für die Einführung der Mikroluftporen (< 300 µm) weniger Zwischenräume im Korngerüst vorhanden. In einem Beton mit einem hohen Anteil an Sand der Korngruppe 0,25/1 mm (z.B. M7) lagern sich die Mikroluftporen in die Zwischenräume des Korngerüsts an. Da die Luftporenbildung erleichtert wird, kann die LP-Bildner-Zugabemenge gesenkt werden.

Wenn gleichzeitig mit dem Luftporenbildner ein Fließmittel zugegeben wurde, konnte die LP-Bildner-Zugabemenge im Vergleich zum Beton ohne Fließmittelzugabe verringert werden (M20 im Vergleich zu M17). Die weichere Konsistenz des Betons erleichterte die Luftporenbildung. Wenn erst der LP-Bildner und anschließend das Fließmittel (M21 im Vergleich zu M17) zugegeben wurde, änderte sich die erforderliche Zugabemenge des LP-

is available in the granular skeleton for the introduction of micro air voids (< 300 µm). In a concrete with a high proportion of sand in the 0.25/1 mm size group (e.g. M7) the micro air voids accumulate in the interstitial spaces of the granular skeleton. The formation of air voids is made easier so the quantity of air-entraining agent added can be reduced.

When a superplasticizer was added at the same time as the air-entraining agent it was possible to reduce the quantity of air-entraining agent added when compared to concrete without superplasticizer (M20 in comparison with M17). The softer consistency of the concrete assisted the formation of air voids. When the air-entraining agent was added first followed subsequently by the superplasticizer (M21 in comparison with M17) there was hardly any change in the quantity of air-entraining agent required as the air void system had to form in the stiff initial concrete.

5.3.2 Air void parameters

The air void parameters, namely spacing factor (Figure 4) and micro air void content (Figure 5), were determined on the concretes made with different Portland cements, fine sand contents and fresh concrete temperatures. All the concretes tested complied with the spacing factor ≤ 0.20 mm required in the suitability test. Only one mix with a fresh concrete temperature of 10 °C (M 13a) that had a micro air void content of 1.7 vol.% was slightly below the required value of ≥ 1.8 vol.%. As a whole, the differences are not very large and therefore not of practical relevance. For the mixes made with air-entraining agent N1 with a small increase in the air content with double the quantity the spacing factors and the micro air void contents were both somewhat smaller than for the comparable mixes made with air-entraining agent S2 with a sharp increase in air content for double the quantity. Evaluation of the pore size distributions showed that, as a rule, the proportion of small pores < 50 µm was somewhat lower and the proportion of pores < 300 µm was somewhat higher in concretes made with air-entraining agent S2 than in those made with air-entraining agent N1. With air-entraining agent N1 somewhat more small pores < 50 µm with correspondingly smaller spacing factors (Figure 4) and fewer pores up to 300 µm are produced than with air-entraining agent S2, which would explain the higher micro air void content with air-entraining agent S2 (Figure 5).

The air void parameters were not affected by the cement. The spacing factor was somewhat reduced with increasing fine sand content while no consistent trend could be recognized for the micro air void content. The fresh concrete temperature had the relatively greatest influence. This same tendency occurred with both air-entraining agents.

For stiff concretes, such as the concrete with a high fresh concrete temperature of 30 °C, the quantity of air-entraining agent had to be greatly increased to achieve the required air content of 5 % (Figure 3). At the same time, the smallest spacing factors of

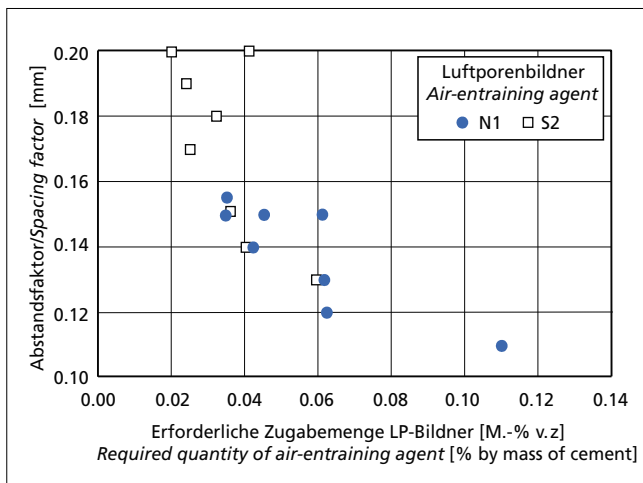


Bild 6: Abstandsfaktor in Abhängigkeit von der Zugabemenge der Luftporenbildner (Gesamtluftporengehalt rd. 5 Vol.-%)
Figure 6: Spacing factor as a function of the quantity of air-entraining agents (total air-void content about 5 vol.-%)

Bildners kaum, da das Luftporensystem im steifen Ausgangsbeton gebildet werden musste.

5.3.2 Luftporenkennwerte

An den Betonen mit unterschiedlichen Portlandzementen, Feinstsandgehalten und Frischbetontemperaturen wurden die Luftporenkennwerte: Abstandsfaktor (Bild 4) und Mikro-Luftporengehalt (Bild 5) bestimmt. Der in der Eignungsprüfung geforderte Abstandsfaktor $\leq 0,20$ mm wurde von allen geprüften Betonen eingehalten. Beim Mikro-Luftporengehalt wurde der geforderte Wert von $\geq 1,8$ Vol.-% nur bei einer Mischung mit einer Frischbetontemperatur von 10°C (M13a) mit $1,7$ Vol.-% geringfügig unterschritten. Insgesamt sind die Unterschiede nicht sehr groß und daher nicht praxisrelevant. Bei den Mischungen mit dem LP-Bildner N1 mit geringer Erhöhung des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge waren sowohl die Abstandsfaktoren und die Mikro-Luftporengehalte etwas kleiner als bei den vergleichbaren Mischungen mit dem LP-Bildner S2 mit starker Erhöhung des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge. Die Auswertung der Porengrößenverteilungen zeigte, dass i.d.R. bei den Betonen mit dem LP-Bildner S2 der Anteil an kleinen Poren $< 50\ \mu\text{m}$ etwas geringer und der Anteil an Poren $< 300\ \mu\text{m}$ etwas höher als beim LP-Bildner N1 war. Beim LP-Bildner N1 entstehen im Vergleich zum LP-Bildner S2 etwas mehr kleine Poren $< 50\ \mu\text{m}$ mit entsprechend geringeren Abstandsfaktoren (Bild 4) und weniger Poren bis $300\ \mu\text{m}$, was die höheren Mikro-Luftporengehalte beim LP-Bildner S2 (Bild 5) erklären würde.

Die Luftporenkennwerte wurden durch den Zement nicht beeinflusst. Mit zunehmendem Feinstsandgehalt verringerte sich der Abstandsfaktor etwas, während beim Mikro-Luftporengehalt keine einheitliche Tendenz zu erkennen war. Den vergleichsweise größten Einfluss hatte die Frischbetontemperatur. Diese Tendenzen traten bei beiden LP-Bildnern gleichartig auf.

Bei steifen Betonen wie z.B. bei dem Beton mit einer hohen Frischbetontemperatur von 30°C musste die LP-Bildnermenge stark erhöht werden, um den geforderten Luftgehalt von 5% zu erreichen (Bild 3). Gleichzeitig wurde bei der Frischbetontemperatur von 30°C der kleinste Abstandsfaktor (Bild 4) von $0,11$ mm (N1) bzw. $0,13$ mm (S2) und beim LP-Bildner S2 mit $2,8\%$ der größte und beim LP-Bildner N1 mit $2,5\%$ der zweitgrößte Mikro-Luftporengehalt (Bild 5) ermittelt. Eine Ursache hierfür ist, dass bereits beim Mischen die eingeführte Luft bei dem infolge der höheren Frischbetontemperatur von 30°C steiferem Beton stärker in kleinere Poren aufgeteilt wird als dies bei dem infolge der geringen Frischbetontemperatur von 10°C weicherem Beton der Fall ist. Bei

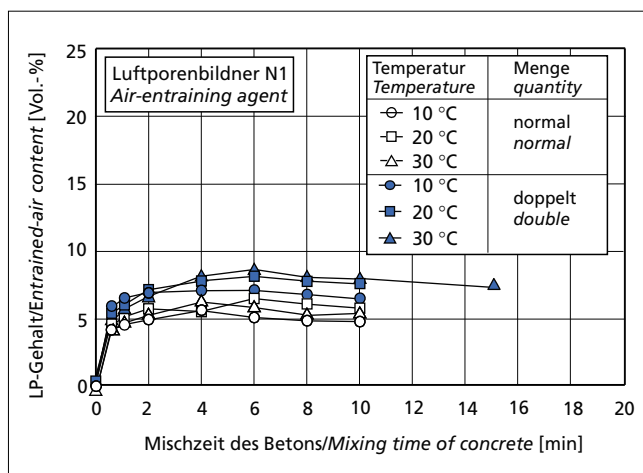


Bild 7: Entwicklung des Luftgehalts des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Frischbetontemperatur bei Verwendung des Luftporenbildners N1 (Luftporenbildner der Gruppe 1 mit geringem Anstieg bei doppelter Zugabemenge)

Figure 7: Development of the air content of the fresh concrete as a function of the mixing time and of the fresh concrete temperature when using air-entraining agent N1 (air-entraining agent from group 1 with low increase for double the added quantity)

$0,11$ mm (N1) and $0,13$ mm (S2) (Figure 4) were determined at the fresh concrete temperature of 30°C , as were the largest micro air void content of $2,8\%$ with air-entraining agent S2 and the second-largest micro air void content of $2,5\%$ with air-entraining agent N1 (Figure 5). One reason for this is that even during the mixing the air that has been introduced is divided more strongly into smaller pores in the concrete that is stiffer because of the higher fresh concrete temperature of 30°C than is the case with the softer concrete resulting from the low fresh concrete temperature of 10°C . For the same air content more small pores therefore remain in the hardened concrete and the spacing factor is reduced and the micro air void content rises.

Figure 6 shows that a higher required quantity tends to lead to a reduction in the spacing factor. A small spacing factor requires the concrete to contain as many small air voids as possible for a given total air content. For the same air content an air void system with many small pores has a greater specific area than an air void system with a few large voids. The molecules of the air-entraining agent accumulate at the interfaces between the air bubbles and the liquid. More molecules of air-entraining agent are therefore needed for stabilizing larger surface areas. Marginal conditions, such as an increase in the fresh concrete temperature, which lead to an increased quantity of air-entraining agent to achieve an air content of 5% , tend to reduce the spacing factor. These test results confirm the observations reported in [27].

5.3.3 Air void formation as a function of mixing time

5.3.3.1 Air content of the fresh concrete

The dependence of air void formation on the concrete mixing time was determined for all the named parameters with the normal addition quantity determined in the preliminary test and double this quantity. Air-entraining agent N1 was used as an example of an air-entraining agent with a slight increase in air content with double the quantity, and air-entraining agent S2 was used as an example of an air-entraining agent with a sharp increase in the air content with double the quantity. Because of the great influence of the fresh concrete temperature this parameter is shown by way of example in Figures 7 and 8 while brief summaries are given for the other parameters. The detailed results can be found in the final report [1].

a) Normal addition quantity

With the normal addition quantity no differences were apparent in the air void formation. The target air content of about 5 vol.-% was reached after a mixing time of about one minute regardless of the mix composition or the air-entraining agent (N1 or S2). After that the air content did not increase signifi-

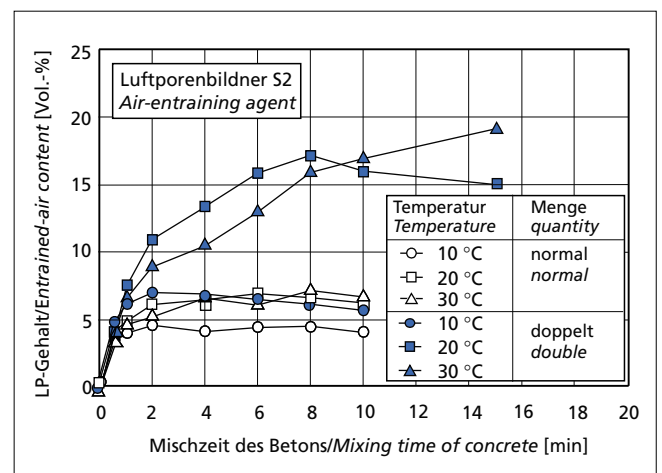


Bild 8: Entwicklung des Luftgehalts des Frischbetons in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Frischbetontemperatur bei Verwendung des Luftporenbildners S2 (Luftporenbildner der Gruppe 2 mit starkem Anstieg bei doppelter Zugabemenge)

Figure 8: Development of the air content of the fresh concrete as a function of the mixing time and of the fresh concrete temperature when using air-entraining agent S2 (air-entraining agent from group 2 with sharp increase for double the added quantity)

Tafel 6: Luftporenkennwerte am Festbeton in Abhängigkeit von der Mischzeit und der Zugabemenge des LP-Bildners N1 (Mischung M9a)
Table 6: Air-void parameters in the hardened concrete as a function of the mixing time and the quantity of air-entraining agent N1 (mixture 9a)

Zugabemenge LP-Bildner N1 Quantity AEA N1	Luftporenkennwerte am Festbeton in Abhängigkeit der Mischzeit Air-void parameters in the hardened concrete as a function of the mixing time											
	0,5 Minuten / minutes				2 Minuten / minutes				6 Minuten / minutes			
	AF [mm]	L300 [Vol.-%]	L _a [Vol.-%]	L300/L _a ¹⁾ –	AF [mm]	L300 [Vol.-%]	L _a [Vol.-%]	L300/L _a ¹⁾ –	AF [mm]	L300 [Vol.-%]	L _a [Vol.-%]	L300/L _a ¹⁾ –
normal (0,061 v.z.)	0,21	1,4	2,8	0,50	0,14	2,9	5,3	0,55	0,10	3,4	5,4	0,63
doppelt (0,122 v.z.)	0,17	2,5	4,5	0,56	0,11	4,0	6,9	0,58	0,07	5,3	7,1	0,75

¹⁾ auf Luftgehalt bezogener Mikro-Luftporengehalt / Micro-air void content in relation to total air content

gleichem Luftgehalt verbleiben daher mehr kleine Poren im erhärteten Beton und der Abstandsfaktor verringert sich und der Mikro-Luftporengehalt steigt.

Bild 6 zeigt, dass eine höhere erforderliche Zugabemenge tendenziell zu einer Verringerung des Abstandsfaktors führt. Ein geringer Abstandsfaktor setzt voraus, dass der Beton bei einem vorgegebenen Gesamtluftgehalt möglichst viele kleine Luftporen enthält. Bei gleichem Luftgehalt weist ein Luftporensystem mit vielen kleinen Poren eine größere spezifische Oberfläche auf als ein Luftporensystem mit wenigen großen Poren. Die Luftporenbildnermoleküle lagern sich in den Grenzflächen Luftblase/Flüssigkeit an. Für die Stabilisierung größerer Oberflächen werden somit auch mehr Luftporenbildnermoleküle benötigt. Randbedingungen, wie z.B. eine Erhöhung der Frischbetontemperatur, die zu einer erhöhten LP-Bildner-Zugabemenge zur Erzielung eines Luftgehalts von 5 % führen, haben in der Tendenz eine Verringerung des Abstandsfaktors zur Folge. Diese Versuchsergebnisse bestätigen die in [27] berichteten Beobachtungen.

5.3.3 Mischzeitabhängige Luftporenbildung

5.3.3.1 Luftgehalt des Frischbetons

Die Abhängigkeit der Luftporenbildung von der Mischzeit des Betons wurde für alle genannten Parameter mit der im Vorversuch ermittelten normalen und doppelten Zugabemenge bei Verwendung der Luftporenbildner N1 (Beispiel für einen Luftporenbildner mit geringem Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge) und S2 (Beispiel für einen Luftporenbildner mit starkem Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge) ermittelt. Wegen des großen Einflusses der Frischbetontemperatur ist dieser Parameter in den Bildern 7 und 8 beispielhaft dargestellt. Die anderen Parameter werden summarisch zusammengefasst. Die detaillierten Ergebnisse können dem Schlussbericht [1] entnommen werden.

a) normale Zugabemenge

Bei normaler Zugabemenge zeigten sich keine Unterschiede in der Luftporenbildung. Der angestrebte Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% wurde unabhängig von der Mischungszusammensetzung und vom LP-Bildner (N1 bzw. S2) nach einer Mischzeit von rd. einer Minute erreicht. Danach erhöhte sich der Luftgehalt nicht mehr wesentlich und blieb konstant. Dieses Verhalten trat unabhängig von der Frischbetontemperatur (10 °C, 20 °C bzw. 30 °C, Bilder 7 und 8), dem verwendeten Zement, dem Feinstsandgehalt und dem w/z-Wert bzw. einer zusätzlichen Fließmittelzugabe auf. Durch weiteres Mischen wurden z.T. vereinzelt Luftporen ausgetrieben, sodass der Luftgehalt geringfügig abfiel.

b) doppelte Zugabemenge

Bei doppelter Zugabemenge zeigten sich Unterschiede in Abhängigkeit des LP-Bildners. Beim LP-Bildner N1 (geringer Anstieg bei doppelter Zugabemenge) erhöhten sich die Luftgehalte i.d.R. bei Verdopplung der Zugabemenge bei allen Versuchsvarianten nur unterproportional um rd. 2 % bis 3 %. Am Beispiel der Frischbetontemperatur wird dies deutlich. Bei Steigerung der Frischbetontemperatur von 10 °C auf 30 °C erhöhte sich der Luftgehalt nur unwesentlich von rd. 5 % auf rd. 8 %. Nach Mischzeiten von rd. zwei Minuten stellte sich unab-

cantly and remained constant. This behaviour occurred regardless of the fresh concrete temperature (10 °C, 20 °C and 30 °C, Figures 7 and 8), the cement used, the fine sand content and the w/c ratio or addition of extra superplasticizer. In some cases individual air voids were expelled by further mixing so that the air content dropped slightly.

b) Double addition quantity

With double the addition quantity differences became apparent which depended on the air-entraining agent. With air-entraining agent N1 (small increase with double the quantity) there was as a rule a disproportionately small increase by only about 2 % to 3 % with all test variants when the quantity added was doubled. This becomes clear from the example of the fresh concrete temperature. When the fresh concrete temperature was increased from 10 °C to 30 °C the air content increased only slightly from about 5 % to about 8 %. After mixing times of around two minutes a constant air content was established regardless of the fresh concrete temperature. The air void formation is affected to only a comparatively small extent by the fresh concrete temperature (or by the other parameters, namely cement, fine sand content, etc.), the quantity added or the mixing time. The air-entraining agent is also always virtually completely broken down after a comparatively short mixing time. The air content therefore cannot be substantially increased by subsequent mixing of the concrete.

With air-entraining agent S2 (sharp increase with double the quantity) doubling the quantity added resulted as a rule in at least a doubling of the air content. An exception to this was the concrete with a fresh concrete temperature of 10 °C. In this case only a slight increase in the air content was recorded when the quantity was doubled, and the air void formation was completed after a mixing time of only about one minute. The air void development of the concretes with fresh concrete temperatures of 20 °C and 30 °C was characterized by a rise in the air content to about 18 % when the quantity was doubled, meaning that the air content was increased three-fold. The air void formation was not fully completed even after two minutes mixing time and the air content increased continuously. With high temperatures and increased quantities it is therefore necessary to mix for a longer time for the air-entraining agent to be fully broken down. If, in this case, there is only a short mixing time the requisite quantity of air-entraining agent must be increased to achieve the required air content of, for example, 5 %. The percentage of inadequately activated air-entraining agent in the fresh concrete therefore increases sharply. Subsequent mixing of the concrete then leads to a substantial rise in air content.

5.3.3.2 Air void parameters of the hardened concrete

The air void parameters of the hardened concrete were determined by way of example on mix M9a with air-entraining agent N1 as a function of the mixing time (30 seconds or 2 minutes and 6 minutes) and the quantity added (normal and double) (Table 6). The air content L_a of the hardened concrete with single and double addition quantities after a mixing time of at least two minutes reached an equilibrium state (5.3 % to 5.4 % with single and 6.9 % to 7.1 % with double quantity of air-entraining agent) and after that did not change substantially with further mixing. This confirmed

hängig von der Frischbetontemperatur ein konstanter Luftgehalt ein. Die Luftporenbildung wird nur in vergleichsweise geringem Ausmaß von der Frischbetontemperatur (bzw. den anderen Parametern Zement, Feinstsandgehalt usw.), der Zugabemenge oder der Mischzeit beeinflusst. Der Luftporenbildner ist auch nach vergleichsweise kurzer Mischzeit immer fast vollständig aufgeschlossen. Ein nachträgliches Mischen des Betons kann daher den Luftgehalt nicht wesentlich erhöhen.

Bei dem LP-Bildner S2 (starker Anstieg bei doppelter Zugabemenge) ergab sich bei Verdoppelung der Zugabemenge i.d.R. mindestens eine Verdoppelung des Luftgehalts. Ausgenommen hiervon war der Beton mit einer Frischbetontemperatur von 10 °C. In diesem Fall war bei Verdopplung der Zugabemenge nur ein geringer Anstieg des Luftgehalts zu verzeichnen, und die Luftporenbildung war bereits nach einer Mischzeit von rd. einer Minute abgeschlossen. Kennzeichnend für die Luftporenentwicklung der Betone mit Frischbetontemperaturen von 20 °C und 30 °C war ein starker Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge auf rd. 18 %, sodass eine Verdreifachung zu verzeichnen war. Auch nach zwei Minuten Mischzeit war die Luftporenbildung noch nicht vollständig abgeschlossen, und der Luftgehalt erhöhte sich stetig. Bei hohen Temperaturen und erhöhten Zugabemengen muss daher länger gemischt werden, um den Luftporenbildner vollständig aufzuschließen. Wird in diesem Fall nur kurz gemischt, muss die erforderliche Luftporenbildner-Zugabemenge gesteigert werden, um den gewünschten Luftgehalt von z.B. 5 % zu erreichen. Der Anteil an ungenügend aktiviertem Luftporenbildner im Frischbeton steigt damit stark an. Ein nachträgliches Mischen des Betons führt dann zu einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts.

5.3.3.2 Luftporenkennwerte des Festbetons

Die Luftporenkennwerte des Festbetons wurden beispielhaft an der Mischung M9a mit dem LP-Bildner N1 in Abhängigkeit der Mischzeit (30 s bzw. 2 min und 6 min) und der Zugabemenge (normal und doppelt) ermittelt (Tafel 6). Der Luftgehalt L_a des Festbetons erreichte bei einfacher und doppelter Zugabemenge nach mindestens zwei Minuten Mischzeit einen Beharrungszustand (5,3 % bis 5,4 % bei einfacher und 6,9 % bis 7,1 % bei doppelter LP-Bildner-Zugabemenge) und veränderte sich danach durch weiteres Mischen nicht mehr wesentlich. Dies bestätigen die Versuchsergebnisse zur mischzeitabhängigen Entwicklung des Frischbetonluftgehalts (Bild 1). Bei normaler Zugabemenge und kurzer Mischzeit von 30 Sekunden wurden die Anforderungen an Abstandsfaktor ($\leq 0,20$ mm) mit 0,21 mm und Mikro-Luftporengehalt ($\geq 1,8$ Vol.-%) mit 1,4 Vol.-% nicht eingehalten. Spätestens nach zwei Minuten Mischzeit hat sich bei normaler Zugabemenge das geforderte feine Luftporensystem entwickelt. Bei überhöhter Zugabemenge wurden die geforderten Luftporenkennwerte bereits nach einer Mischzeit von 30 Sekunden erreicht.

Im Gegensatz zum Gesamtluftgehalt (konstant nach rd. einer Minute Mischzeit, Bild 1) ändert sich mit zunehmender Mischzeit das Luftporengefüge. Nach zwei bzw. sechs Minuten Mischzeit erhöht sich bei gleichbleibendem Luftgehalt L_a der Mikro-Luftporengehalt L300 sowie der Anteil der Mikro-Luftporen am Gesamtluftgehalt, und der Abstandsfaktor verringert sich. Mit zunehmender Mischzeit ist daher bei gleichbleibendem Gesamtluftgehalt eine Verfeinerung des Luftporensystems zu verzeichnen.

6 Ursache für eine erhöhte Luftporenbildung in der Praxis

Die Luftporenbildung wird neben anderen Randbedingungen maßgeblich durch die Luftporenbildner selbst beeinflusst. Das Verhalten der LP-Bildner konnte nicht systematisch einer Wirkstoffart (synthetisch oder natürlich) zugeordnet werden. Dabei muss beachtet werden, dass bei den Versuchen keine reinen Wirkstoffe, sondern handelsübliche LP-Bildner, die oft ein Gemisch verschiedener Ausgangsstoffe sind, verwendet wurden. Um trotzdem die unterschiedliche Luftporenbildung in Abhängigkeit der Luftporenbildner zu charakterisieren, ist in Bild 9 der Luftgehalt in Abhängigkeit von der Zugabemenge schematisch dargestellt. Das Verhalten der Luftporenbildner kann zwei Gruppen zugeordnet werden, zwischen denen fließende Übergänge möglich sind:

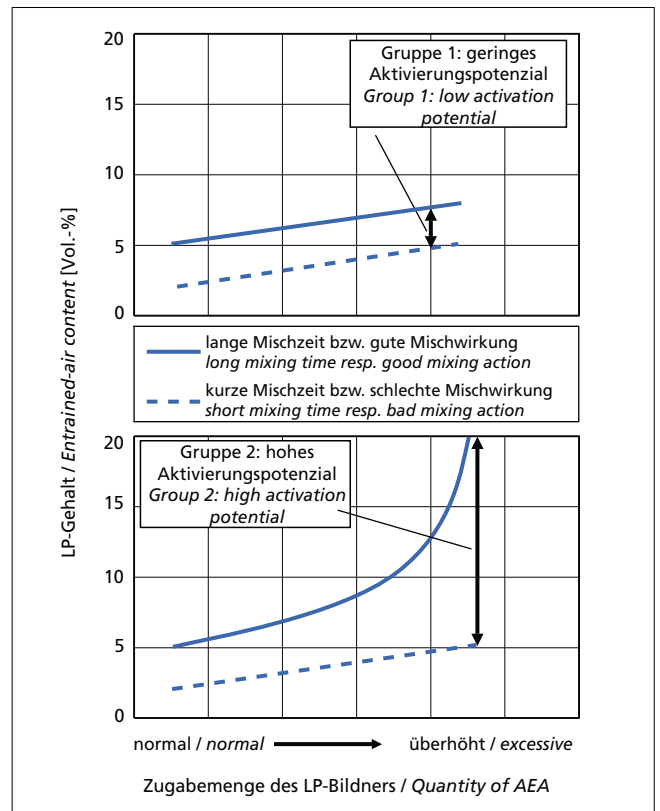


Bild 9: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Luftgehalts des Frischbetons von der Zugabemenge des Luftporenbildners und der Mischzeit/Mischwirkung der Mischanlage

Figure 9: Diagram showing the dependence of the air void content of fresh concrete on the quantity of air-entraining agent and on the mixing time/mixing effect of the mixing plant

the test results of the time-dependent development of the fresh concrete air content (Figure 1). With a normal quantity and a short mixing time of 30 seconds the spacing factor of 0.21 mm did not meet the requirement for (≤ 0.20 mm) and the micro air void content of 1.4 vol.% did not meet the requirement for (≥ 1.8 vol.%). The required fine air void system had developed after two minutes' mixing time at most with the normal addition quantity. With the excessive quantity the required air void parameter was achieved after a mixing time of only 30 seconds.

In contrast to the total air content (constant after a mixing time of about one minute, Figure 1) the air void microstructure changes with increasing mixing time. After mixing times of two and six minutes the micro air void content L300 and the percentage of micro air voids in the total air content increased with constant air content L_a , while the spacing factor fell. A refinement of the air void system therefore takes place with increasing mixing time and constant total air content.

6 Cause of increased air void formation under practical conditions

Air void formation is affected not only by other marginal conditions but also to a great extent by the air-entraining agent itself. The behaviour pattern of the air-entraining agents could not be assigned systematically to a particular type of active ingredient (synthetic or natural). It must be borne in mind that the air-entraining agents used in the tests were not pure active ingredients but normal commercial air-entraining agents which are often a mixture of various primary materials. In order, in spite of this, to show how the air void formation differs depending on the air-entraining agent the air content is shown diagrammatically in Figure 9 as a function of the quantity of air-entraining agent added. The behaviour patterns of the air-entraining agents can be assigned to two groups between which smooth transitions are possible:

Bei Luftporenbildnern der Gruppe 1 (Bild 9 oben) hat eine unterschiedliche Zugabemenge und/oder Mischzeit/Mischwirkung nur geringe Änderungen des LP-Gehalts zur Folge. Diese LP-Bildner sind auch bei hoher Zugabemenge und/oder kurzer Mischzeit/schlechter Mischwirkung fast vollständig aktiviert. Längere Mischzeiten und überhöhte Zugabemengen bewirken daher nur eine geringe Steigerung des Luftgehalts. Die Luftporenbildung wird auch nur in vergleichsweise geringem Ausmaß von anderen Randbedingungen wie z.B. der Betonzusammensetzung oder der Frischbetontemperatur beeinflusst. Betone, die mit einem Luftporenbildner der Gruppe 1 hergestellt wurden, haben somit nur ein vergleichsweise geringes nachträgliches Aktivierungspotenzial.

Bei der zweiten Gruppe von Luftporenbildnern (Bild 9 unten) ist bei Anhebung der Zugabemenge und kurzer Mischzeit/schlechter Mischwirkung ebenfalls nur ein geringer Anstieg des Luftgehalts zu erkennen. Bei kurzer Mischzeit und einer überhöhten Zugabe enthält der Frischbeton aber eine wesentlich größere Menge an nicht aufgeschlossenem Luftporenbildner, der nicht vollständig aktiviert wurde. Werden LP-Bildner der Gruppe 2 infolge kurzer Mischzeit/schlechter Mischwirkung stark überdosiert, um den gewünschten Luftgehalt zu erzielen, enthält der Frischbeton einen hohen Anteil an ungenügend aktiviertem LP-Bildner. Bei einem nachträglichen Mischen des Betons besteht die Gefahr eines überproportionalen Anstiegs des Luftgehalts (hohes Aktivierungspotenzial). Dieses Verhalten zeigte sich auch bei den im Versuchsprogramm untersuchten Randbedingungen, insbesondere bei einer hohen Frischbetontemperatur.

Die Ursache für die unterschiedliche Luftporenbildung liegt vermutlich darin begründet, dass sich in der Abhängigkeit der chemischen Zusammensetzung des LP-Bildners der Anteil des im Frischbeton gelösten LP-Bildners ändert. Nur der gelöste Anteil steht für die Stabilisierung der Luftporen zur Verfügung. Die Wirkungsmechanismen/Abhängigkeiten zwischen Luftporenbildung und Art des Luftporenbildners sollen in einem gesonderten Untersuchungsprogramm erforscht werden.

Die auf einigen Baustellen beobachtete Erhöhung des Luftgehalts ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass bei der Herstellung des Betons infolge kurzer Mischzeiten und/oder einer zu geringen Mischwirkung der Mischanlage der Luftporenbildner überdosiert wurde, um den geforderten Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% zu erreichen. Nach dem Mischen weist der Frischbeton dann zwar den geforderten Luftgehalt auf, enthält aber einen Anteil an ungenügend aufgeschlossenem Luftporenbildner. Der Beton wird i.d.R. mit Kipperfahrzeugen zur Einbaustelle transportiert und somit während des Transports nicht gemischt. Nach dem Abkippen vor dem Fertiger hat sich daher der Luftgehalt des Betons im Verlauf des baustellenüblichen Zeitraums von rd. 30 Minuten zwischen Mischen und Abkippen kaum verändert und beträgt immer noch rd. 4 Vol.-% bis 5 Vol.-%. Während des Einbaus kommt es dann zu einem Energieeintrag in den Beton im Bereich der Verteilerschnecke des Fertigers, im Bereich der Mörtelwalze oder während der Verdichtung. Dadurch kann der Luftporenbildner zusätzlich aufgeschlossen und der Luftgehalt erhöht werden. Ähnliche Effekte sind bei Transportbeton bekannt, bei dem sich der Luftporengehalt zwischen Mischwerk und Baustelle insbesondere bei drehender Trommel erhöhen kann. In Extremfällen (hohes Aktivierungspotenzial, s. Bild 9 unten) kann durch einen überhöhten Luftgehalt die Druckfestigkeit des Betons erheblich vermindert werden.

7 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

7.1 Zusammenfassung

Bei einzelnen Straßenbaustellen ist eine ungewöhnliche Luftporenbildung beobachtet worden. Im Vergleich zum Frischbeton wurde im Festbeton ein stark erhöhter Luftgehalt festgestellt. Um die Ursachen für diese nachträgliche Luftporenbildung zu ermitteln, wurde an Straßenbetonen der Einfluss folgender Parameter auf die Luftporenbildung untersucht: Wirkstoffart und Zugabemenge des Luftporenbildners, Zement, Sieblinie und Frischbetontemperatur, w/z-Wert sowie Fließmittelzugabe. In einem Vorversuch wurde zunächst die Luftporenbildner-Zugabemenge so ausgewählt, dass bei einer Mischzeit von zwei Minuten und der gewählten Frischbetontemperatur ein Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% er-

reicht. With the air-entraining agents of Group 1 (Figure 9, top) differing quantities and/or mixing times/mixing actions caused only slight changes in the air void content. These air-entraining agents are also almost completely activated even with large quantities and/or short mixing times/poor mixing effect. Longer mixing times and excessive quantities therefore cause only a slight increase in the air content. The air void formation is also influenced to only a comparatively small extent by other marginal conditions, such as concrete composition or fresh concrete temperature. Concretes which have been produced with an air-entraining agent from Group 1 therefore have only a comparatively small subsequent activation potential.

With the second group of air-entraining agents (Figure 9, bottom) again only a slight increase in the air content is found if the quantity added is increased and there is a short mixing time/poor mixing effect. With a short mixing time and excessive quantity, however, the fresh concrete contains a substantially larger quantity air-entraining agent that has not been fully activated. If, as a result of a short mixing time/poor mixing effect, excessive quantities of air-entraining agents of Group 2 are added in order to achieve the required air content then the fresh concrete will contain a high proportion of inadequately activated air-entraining agent. During subsequent mixing of the concrete there is the danger of a disproportionately large rise in the air content (high activation potential). This behaviour was also apparent with the marginal conditions investigated in the test programme, especially with a high fresh concrete temperature.

The causes of the differing air void formation are presumably due to the fact that the fraction of air-entraining agent dissolved in the fresh concrete changes depending on the chemical composition of the air-entraining agent. Only the dissolved fraction is available for stabilizing the air voids. The action mechanisms / relationships between air void formation and the nature of the air-entraining agent are to be examined in a separate investigative programme.

The increase in air content observed at some construction sites is probably attributable to the fact that, as a result of short mixing times and/or inadequate mixing effect of the mixing plant, excess air-entraining agent was added during the production of the concrete in order to achieve the required air content of about 5 vol.%. After the mixing the fresh concrete does in fact then have the required air content, but it also contains a proportion of inadequately activated air-entraining agent. As a rule the concrete is transported to the spreading site in tipper trucks and is therefore not mixed during the transport. After the concrete has been tipped in front of the paver its air content during the usual period on a construction site of about 30 minutes between mixing and tipping hardly changes and is still about 4 vol.% to 5 vol.%. During placement there is then an input of energy into the concrete at the distribution screw of the paver, at the mortar roller and during compaction. This can cause further activation of the air-entraining agent and the air content increases. Similar effects are known with ready-mixed concrete in which the air void content can increase between the mixing plant and the construction site, especially with rotating drums. In extreme cases (high activation potential, see Figure 9, bottom) the compressive strength of the concrete can be substantially reduced by an excessive air content.

7 Summary and practical recommendations

7.1 Summary

Unusual air void formation has been observed at a few road construction sites. A sharply increased air void content was found in the hardened concrete when compared to the fresh concrete. The influence of the type of active ingredient and the quantity of the air-entraining agent as well as of the cement, the grading curve, the fresh concrete temperature, the w/c ratio and the addition of superplasticizer on the air void formation was examined in road concretes in order to determine the reasons for this subsequent air void formation. In a preliminary trial the quantity of air-entraining agent added was selected to give an air content of about 5 vol.% at a mixing time of 2 min and the chosen fresh concrete temperature. The air void formation was then determined as a function of mixing time using the "normal" addition quantity of air-entrain-

zielt wurde. Anschließend wurde die mischzeitabhängige Luftporenbildung mit der im Vorversuch ermittelten „normalen“ und einer demgegenüber verdoppelten Luftporenbildner-Zugabemenge ermittelt. Die wichtigsten Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Höhere Frischbetontemperaturen, höhere Feinstsandgehalte und geringere w/z-Werte bei gleichbleibendem Zementgehalt des Betons erforderten höhere Luftporenbildner-Zugabemengen, um den geforderten Luftgehalt von 5 Vol.-% zu erreichen. Eine gleichzeitige Fließmittelzugabe verringerte die LP-Bildner-Zugabemenge. Der verwendete Zement hatte einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Zugabemenge. Den größten Einfluss hatte die Frischbetontemperatur, wobei eine Erhöhung der Temperatur von 10 °C auf 30 °C eine Verdreifachung der LP-Bildner-Zugabemenge erforderlich machte.
- Die Luftporenbildner erzeugten in den untersuchten Betonen ein Luftporensystem mit einem ausreichenden Gehalt an kleinen Poren. Bei Betonen mit einem Luftgehalt von rd. 5 Vol.-% wurde bei höheren Frischbetontemperaturen und höheren Feinstsandgehalten ein kleinerer Abstandsfaktor bestimmt. Dabei verringerte sich der Abstandsfaktor tendenziell mit höherer Luftporenbildner-Zugabemenge.
- Bei der mischzeitabhängigen Entwicklung der Luftporenbildung traten unabhängig von Luftporenbildner, Mischungszusammensetzung oder Frischbetontemperatur keine Unterschiede in der Luftporenbildung auf, wenn die normale, im Vorversuch ermittelte Luftporenbildner-Zugabemenge verwendet wurde. Der Luftgehalt stieg nach kurzer Mischzeit auf rd. 5 Vol.-% an und änderte sich auch mit zunehmender Mischzeit nicht mehr wesentlich.
- Bei Verdoppelung der Zugabemenge waren Unterschiede bei den Luftporenbildnern zu erkennen. Eine eindeutige Zuordnung der Versuchsergebnisse zum Wirkstoff des verwendeten Luftporenbildners – synthetisch oder natürlich – war nicht möglich.
- Das unterschiedliche Verhalten der LP-Bildner wird darauf zurückgeführt, dass sich in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des LP-Bildners der Anteil des im Frischbeton gelösten LP-Bildners ändert. Nur der gelöste Anteil steht für die Luftporenbildung zur Verfügung.
- Die auf einigen Straßenbaustellen beobachtete Erhöhung des Luftgehalts ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass durch kurze Mischzeiten und/oder eine schlechte Mischwirkung des verwendeten Mixers der Luftporenbildner überdosiert wurde, um den geforderten Luftgehalt zu erreichen. Dadurch ist im Frischbeton nicht aktivierter Luftporenbildner enthalten, der bei einem späteren Energieeintrag (z.B. im Bereich der Verteilerschnecke des Fertigers, im Bereich der Mörtelwalze oder während der Verdichtung) nachträglich aktiviert wird und eine Erhöhung des Luftgehalts bewirkt.

7.2 Empfehlungen für die Praxis

Um zukünftig einen überhöhten Luftgehalt zu vermeiden, können folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Liegen keine Erfahrungen mit dem Luftporenbildner oder entsprechende Hinweise der Zusatzmittelhersteller vor, sollte in einem Zusatzversuch die in der Eignungsprüfung ermittelte Luftporenbildner-Zugabemenge verdoppelt und der Luftgehalt der Mischungen mit beiden Luftporenbildner-Zugabemengen nach einer kurzen Mischzeit von z.B. 30 Sekunden (abhängig von der Mischwirkung des Mixers) und nach einer verlängerten Mischzeit von rd. vier bis sechs Minuten bestimmt werden. Bei einem wesentlichen Anstieg des Luftgehalts bei doppelter Zugabemenge und verlängerter Mischzeit besteht bei der Bauausführung die Gefahr einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts.
- Bei einer Bauausführung im Sommer sollte zumindest bei größeren Deckenlösen die Festlegung der Luftporenbildner-Zugabemenge auch mit höherer Frischbetontemperatur (z.B. 30 °C) durchgeführt werden.
- Zu Baubeginn wird die von der Eignungsprüfung vorgegebene Mischungszusammensetzung an die Praxisverhältnisse an-

ing agent determined in the preliminary trial and with double the addition quantity. The most important results can be summarized as follows:

- Higher fresh concrete temperatures, higher levels of fine sand and lower w/c ratios for the same cement content of the concrete required greater quantities of added air-entraining agent to reach the required air content of 5 vol.%. Simultaneous addition of superplasticizer reduced the quantity of air-entraining agent added. The cement used had comparatively little influence on the quantity added. The fresh concrete temperature had the greatest influence; three times the quantity of air-entraining agent had to be added for an increase in temperature from 10 °C to 30 °C.
- In the concretes investigated the air-entraining agents generated an air void system with an adequate content of small voids. In concretes with an air content of about 5 vol.% a smaller spacing factor was found at higher concrete temperatures and higher levels of fine sand. The spacing factor tended to fall with higher quantity of added air-entraining agent. During the development of air void formation with mixing time no differences in the air void formation occurred, regardless of the air-entraining agent, mix composition or fresh concrete temperature, when the normal quantity of air-entraining agent, determined in the preliminary trial, was added. The air content rose after a short mixing time to about 5 vol.% and then there was no further significant change with increasing mixing time.
- Differences in the air-entraining agents were detected with double the addition quantity. It was not possible to assign the test results clearly to the active ingredient – synthetic or natural – of the air-entraining agent used.
- The differences in behaviour of the air-entraining agents is attributed to the fact that the amount of air-entraining agent dissolved in the fresh concrete varies depending on the chemical composition of the air-entraining agent. Only the dissolved fraction is available for forming air voids.
- The increase in air content observed at some road construction sites is presumably attributable to the fact that, due to short mixing times and/or poor mixing effect of the mixer used, the air-entraining agent had been added in excess in order to reach the required air content. This means that the fresh concrete contains unactivated air-entraining agent which is activated subsequently during later energy input (e.g. at the distributor screw of the paver, at the mortar roller or during compaction) and produces an increase in air content.

7.2 Practical recommendations

The following recommendations are given to avoid excessive air content in future:

- If there is no available experience with the air-entraining agent or appropriate advice from the manufacturer of the admixture then the quantity of air-entraining agent determined in the performance test should be doubled in an additional test and the air content of the mixes with both addition quantities of air-entraining agent should be determined after a short mixing time of, for example, 30 seconds (depending on the mixing effect of the mixer), and after an extended mixing time of about four to six minutes. If there is a substantial rise in the air content with double the addition quantity and extended mixing time there is a danger of a subsequent rise in the air content during construction work.
- During construction work in summer the quantity of air-entraining agent to be added should also be determined at a higher fresh concrete temperature (e.g. 30 °C), at least with fairly large contract sections.
- At the start of construction the mix composition specified by the performance test is adjusted to suit the actual conditions. In order to check the sensitivity of the concrete with respect to a subsequent increase in air content the fresh concrete air content could be determined after adjusting the concrete firstly with the chosen standard mixing time and also with an extended mixing time. If a substantial rise in air content is found with the extended mixing time then the standard mixing time should be increased.

- gepasst. Um die Empfindlichkeit des Betons hinsichtlich einer nachträglichen Erhöhung des Luftgehalts zu überprüfen, könnten nach Einstellung des Betons die Frischbeton-Luftgehalte einmalig mit der gewählten Standardmischzeit und zusätzlich mit verlängerter Mischzeit bestimmt werden. Zeigt sich bei verlängerter Mischzeit ein wesentlicher Anstieg des Luftgehalts, sollte die Standardmischzeit verlängert werden.
- Die Mindestmischzeit nach ZTV Beton-StB von 45 Sekunden ist unbedingt einzuhalten.
 - Bei Unterbrechungen des Betoneinbaus sollte die Verteilerschnecke des Fertigers stillgelegt werden.
 - Bei Beginn der Fertigung sollte möglichst frühzeitig aus der ersten Tagesleistung eine Frischbetonprobe entnommen und daran Luftgehalt und Rohdichte bestimmt werden.
 - Die bauausführende Firma sollte in ihrer Eigenüberwachung zumindest zu Beginn der Deckenfertigung und insbesondere bei wechselnden Temperaturverhältnissen und Schwankungen der Betonzusammensetzung (Mehlkorngehalt) den Luftgehalt häufiger prüfen und die Einhaltung der Mischzeiten laufend kontrollieren.
 - Zur Vermeidung von Fehlmessungen sollten die verwendeten Luftporentöpfe in regelmäßigen Abständen kalibriert und das Personal laufend geschult werden. Die bei der Bauausführung bestimmten Frischbetonrohdsichten sollten mit den Werten der Eignungsprüfung verglichen werden.

- The minimum mixing time specified in ZTV Beton-StB of 45 seconds must always be maintained.
- If concrete placement is interrupted the distributor screw of the paver should be stopped. At the start of production a fresh concrete sample should be taken as early as possible from the first daily output and its air content and bulk density determined.
- The firm carrying out the construction work should check the air content more frequently during their in-house monitoring, at least at the start of the carriageway production and especially with fluctuating temperature conditions and variations in concrete composition (fines content), and keep a continuous check that the mixing times are maintained.
- To avoid false measurements the air void vessels used should be calibrated at regular intervals and the personnel given on-going training. The fresh concrete bulk densities determined during the construction work should agree with the values of the performance test.

Literatur / Literature

- [1] Eickschen, E.; Siebel, E.: Einfluss der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf die Luftporenbildung unter besonderer Berücksichtigung der Basis des Luftporenbildners. Forschungsauftrag FE 08.161/2000/LRB im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2002
- [2] Eickschen, E.; Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenbildung im Straßenbeton. Straße und Autobahn 52 (2001) H. 9, S. 517–521
- [3] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons, Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H. 167, Berlin 1965, S. 3–57
- [4] Bonzel, J.; Siebel, E.: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977) H. 4, S. 153–157, H. 5, S. 205–211, und H. 6, S. 237–244; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag Düsseldorf
- [5] Sommer, H.: Ein neues Verfahren zur Erzielung der Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons. Zement und Beton 22 (1977) H. 4, S. 124–129
- [6] Gast, R.: Luftporen im Beton – Veränderung durch Transport und Einbau. beton 30 (1980) H. 10, S. 367–371
- [7] Siebel, E.: Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 45 (1995) H. 10, S. 724–730
- [8] Springenschmid, R.: Technische Grundlagen des Straßenbaus und ihre Umsetzung in die Praxis – gestern, heute, morgen. Straße und Autobahn 51 (2000) H. 3, S. 184–191
- [9] Fleischer, W.: Beton mit hohem Frost- und Frosttaumittel-Widerstand. Beton 47 (1997) H. 5, S. 266–273
- [10] Springenschmid, R.: Erfahrungen bei der Verwendung von Luftporenbildnern im Straßenbau. Betonwerk und Fertigteil-Technik 38 (1972) H. 8, S. 587–593
- [11] Breuckmann, K.: Die Anwendung von Betonzusatzmitteln in stationären Betrieben und auf der Baustelle. Betonwerk und Fertigteiltechnik 38 (1972) H. 8, S. 581–587
- [12] Kottas, R.; Hilsdorf, H.: Der Einfluss der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, H. 274, Bonn 1979
- [13] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton. ZTV Beton-StB 2001, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau
- [14] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1991
- [15] DIN EN 480-11 Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton
- [16] Herstellen von Luftporenbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik 68 (2002) H. 1, S. 46–52
- [17] Walz, K.: Luftporenbildende Zusatzmittel. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 123; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin (1956)
- [18] Eickschen, E.; Siebel, E.: Einfluss der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton. beton (48), 1998, H. 9 und 10, S. 580 bis 586 und S. 641–646
- [19] Rixom, M. R.; Mailvaganam, N. P.: Chemical Admixtures for Concrete. 2nd Edition, E. & F.N. Spon, London (1986)
- [20] Deutsche Bauchemie e.V.: Betonzusatzmittel und Umwelt. Sachstandsbericht Mai 1999
- [21] Hermann, K.: Zusatzmittel: LP. Zementbulletin, 62 (11), 1994, S. 2–7
- [22] Mielenz, R. C.; Wolkodoff, V. E.; Backstrom, J. E.; Wheeler, W. H.: Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete. Part 1 – Entrained Air in Unhardened Concrete. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No. 1, July 1958, S. 95–121
- [23] Lea's chemistry of Cement and Concrete / Hewlett, Peter C. (Hrsg.) 4 Auflage, Arnold, London, 1998
- [24] Venuat, M.: Adjuvants et Traitements. Selbstverlag, 1984
- [25] Scripture, E. W. jr.; Benedict, S. W.; Litwinowicz, F. J.: Effect of Temperature and Surface Area of the Cement on Air-Entrainment. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 23, No. 3, Nov. 1951, S. 205–210
- [26] Greening, N.R.: Some causes for variation in required amount of air-entraining agent in portland cement mortars. Journal of the PCA, May 1967, USA
- [27] Saucier, F.; Pigeon, M.; Cameron, G.: Air-void stability, Part V: Temperature, General Analysis and Performance Index. ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 1 (1991), S. 25–36