

Einflüsse auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

Factors affecting the air-void parameters of concrete and its resistance to freeze-thaw with de-icing salt

Eberhard Siebel, Düsseldorf

Übersicht

Zur zielsicheren Herstellung eines Betons mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand ist ein ausreichender Gehalt an kleinen Luftporen erforderlich. Bei steiferen Betonen, z.B. Straßenbetonen, denen außer dem Luftporenbildner keine weiteren Zusatzmittel zugegeben werden, kann man davon ausgehen, daß bei Erzielung eines ausreichenden Gesamtluftgehaltes der Anteil an kleinen Luftporen groß genug ist. Bei der Herstellung weicher Luftporenbetone und bei der Verwendung von Zusatzmitteln, wie z.B. Verflüssiger, Fließmittel und Verzögerer, die zusätzlich zum Luftporenbildner dem Beton zugegeben werden, kann dies nicht mehr unbedingt vorausgesetzt werden.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden aufgrund dieser Ausgangslage Untersuchungen durchgeführt, die dem Einfluß der Konsistenz und der Wirkung von Verflüssigern, Fließmitteln und Verzögerern auf die Luftporenkennwerte und den Frost-Tausalz-Widerstand nachgingen. Die Untersuchungen zeigen, daß bei Zugabe dieser Zusatzmittel der bisher geforderte Gesamtluftgehalt nicht in allen Fällen ein hinreichendes Kriterium für einen ausreichenden Mikro-Luftporengehalt und somit für einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand des Betons ist. In der Praxis müssen deshalb entweder die Luftporenkennwerte bei der Eignungsprüfung ermittelt werden, oder der Gesamtluftgehalt muß gegenüber den Werten der DIN 1045 angehoben werden.

1 Einleitung

Für die Herstellung von Beton mit hohem Frost- bzw. hohem Frost-Tausalz-Widerstand liegen zahlreiche Versuchsergebnisse und langjährige praktische Erfahrungen vor, die ihren Niederschlag in Vorschriften, Normen und Merkblättern gefunden haben. Danach ist für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand – abgesehen von Betonwaren aus erdfeuchtem Beton mit $w/z < 0,40$ – stets ein Luftporenbeton unter Zugabe eines Luftporenbildners zu verwenden. Bei Beton mit hohem Frostwiderstand wird nur dann die Herstellung eines Luftporenbetons in den Regelwerken gefordert, wenn der Wasserzementwert bei massigen Bauteilen 0,60 überschreitet.

Seit der Herstellung von Beton mit Fließmitteln und von Fließbeton werden einem Beton, der einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt ist, außer einem Luftporenbildner auch andere Betonzusatzmittel, wie z.B. Betonverflüssiger, Fließmittel oder Verzögerer, zugegeben, um den Beton leichter und länger verarbeiten zu können. Dadurch hat die Frage des Zusammenwirkens mehrerer Zusatzmittel unterschiedlicher Art und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften zunehmend an Bedeutung gewonnen.

2 Stand der Erkenntnisse

Über den Frost- und den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, über den Einsatz von Luftporenbildnern und über die Leistungsmerkmale von Luftporenbeton liegen zahlreiche Untersuchungsergebnisse vor [u.a. 1 bis 5]. Hinsichtlich des Zusammenwirkens von Luftporenbild-

Abstract

An adequate content of small air-voids is required to achieve dependable manufacture of concrete with a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt. With fairly stiff concretes, e.g. concretes for roads, which contain no further admixtures apart from air-entraining agents, it can be assumed that there will be sufficient quantity of small air voids provided an adequate total air content is achieved. However, this cannot necessarily be assumed when manufacturing soft, air-entrained, concretes and when admixtures such as plasticizers, superplasticizers, and retarders are added to the concrete as well as the air-entraining agent.

Because of this situation, investigations were carried out at the Research Institute of the Cement Industry which examined the influence of consistency and of plasticizers, superplasticizers, and retarders on the air-void parameters and on the resistance to freeze-thaw with de-icing salt. The investigations show that when these admixtures are used the total air content is no longer in all cases a sufficient criterion of adequate micro-air-void content and hence of adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt. In practice it is therefore necessary either to determine the air-void parameters during suitability testing or to increase the total air content above the values in DIN 1045.

1 Introduction

There are numerous trial results and years of practical experiences relating to the manufacture of concrete with a high resistance to freeze-thaw and freeze-thaw with de-icing salt, and these are reflected in regulations, standards and codes of practice. According to these an air-entrained concrete with added air-entraining agent should always be used for concrete with a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt – apart from those concrete products made from dry-packed concrete with $w/c < 0.40$. The regulations in Germany only require concrete with a high resistance to freeze-thaw to be made with air-entrained concrete if the water-cement ratio in very large components exceeds 0.60.

Ever since concrete with superplasticizers and superplasticized concrete have been manufactured, not only an air-entraining agent but also other concrete admixtures, such as concrete plasticizers, superplasticizers or retarders, have been added to concretes which are exposed to freeze-thaw attack with de-icing salt to make them more workable and for a longer period. Therefore the question of the combined effect of several admixtures of different sorts and their influence on the properties of the concrete has become increasingly important.

2 Current situation

Numerous results of investigations are available [i.a. 1 to 5] which relate to the resistance of concrete to freeze-thaw and to freeze-thaw with de-icing salt, to the use of air-entraining agents, and to the per-

ner und Betonzusatzmitteln anderer Art wird in der Literatur in erster Linie nur über Untersuchungen mit Fließmitteln [6 bis 13] berichtet.

Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand muß einen ausreichend dichten Zementstein ($w/z \leq 0,50$) aufweisen, unter Verwendung eines frostbeständigen Zuschlags hergestellt werden und darüber hinaus – mit Ausnahme der erdfeuchten Betone mit $w/z < 0,40$ – einen Luftporenbildner enthalten, durch den ein ausreichender Gehalt an kleinen Luftporen im Beton erzeugt wird. Dieser Gehalt an kleinen Poren wird mit der Bestimmung des Mikro-Luftporengehaltes L 300 – alle Poren bis zu $300 \mu\text{m}$ – oder des Abstandsfaktors – ein aus einem idealisierten Porensystem abgeleiteter Kennwert für den Abstand eines Punktes im Zementstein zur nächsten Pore – am Festbeton [14] oder neuerdings auch am Frischbeton [15] beurteilt. Umfangreiche Untersuchungen [u.a. 1, 2] haben gezeigt, daß für den Nachweis eines ausreichenden Gehalts an kleinen Poren bei Verwendung eines geeigneten Luftporenbildners die Bestimmung des Gesamtluftgehaltes am Frischbeton näherungsweise genügt. Dieser Gesamtluftgehalt muß beispielsweise bei einem Größtkorn des Zuschlags von 16 mm mindestens 4,5 % betragen (Einzelwert $\geq 4,0 \%$). Zutreffender kann der Widerstand des Betons gegen einen Frost-Tausalz-Angriff durch eine Bestimmung der Luftporenkennwerte selbst beurteilt werden.

Die Untersuchungen über den Einfluß von Fließmitteln auf die Luftporenkennwerte und auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Luftporenbeton [6 bis 13] zeigten bei gleichem Gesamtluftgehalt eine Verringerung des Gehaltes an kleinen Luftporen $< 300 \mu\text{m}$ und eine Vergrößerung des Gehaltes an größeren Poren $> 500 \mu\text{m}$. Hieraus wurde geschlossen, daß sich kleine Luftporen durch die Wirkung von Fließmitteln zu größeren vereinigen. Als Ursachen für dieses Zusammenfließen kleiner Poren wurden die in den Fließmitteln enthaltenen Entschäumer und die dispergierende Wirkung der Fließmittel vermutet. Dies führte zu dem Vorschlag, einen um 0,5 bis 1,0 Vol.-% höheren Luftgehalt des Frischbetons bei Verwendung von Fließmitteln für Betone, die einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt sind, zu fordern. Zusätzlich wird eine Überprüfung der Luftporenkennwerte am Festbeton bei einer Kombinationsprüfung von Luftporenbildner und Fließmittel gefordert [16,17]. Der Einfluß anderer Zusatzmittel, wie z. B. Verflüssiger und Verzögerer, auf die Luftporenkennwerte wurde bisher nicht systematisch untersucht.

3 Zielsetzung der Forschungsarbeit

Im Rahmen dieses aus Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft geförderten AiF-Vorhabens Nr. 7424 wurde den Fragen nachgegangen, welche der bei Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand häufig zusätzlich verwendeten Zusatzmittelarten die Luftporenverteilung und damit den Frost-Tausalz-Widerstand beeinträchtigen können, wie groß diese Beeinträchtigung ist und welche Maßnahmen zur Sicherstellung des hohen Frost-Tausalz-Widerstandes von Luftporenbeton bei Verwendung solcher Zusatzmittel zu treffen sind. Dabei sollten auch die derzeitigen Anforderungen an die Luftporenkennwerte, mit denen ein Beton hinsichtlich seines Frost-Tausalz-Widerstandes beurteilt werden kann, überprüft werden.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zement, Zuschlag und Zugabewasser

In die Untersuchungen wurden zwei Portlandzemente, ein Z 35 F (CEM I 32,5 R) und ein Z 45 F (CEM I 42,5 R) nach DIN 1164 einbezogen, die hinsichtlich der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung ein mittleres Verhalten der in Deutschland hergestellten Zemente aufwiesen. Als Zuschlag wurde Rheinkiesand der Faktoren 0 bis 2 mm, 2 bis 8 mm und 8 bis 16 mm aus dem Raum Düsseldorf und Quarzmehl 0 bis 0,25 mm und Quarzsand 0 bis 1 mm aus dem Raum Köln verwendet. Der Zuschlag entsprach nach Angaben des Lieferwerks sowie nach augenscheinlicher Beurteilung und einigen Kontrollprüfungen den Anforderungen in DIN 4226-1. Die Zusammensetzung des Zuschlags lag im Bereich der Sieblinie A/B 16.

4.1.2 Betonzusatzmittel

Es wurden 9 Luftporenbildner auf der Basis von Wurzelharz (siehe Tafel 1) eingesetzt, hiervon 5 mit höherem Feststoffgehalt, wie sie

formance of air-entrained concrete. However, the reports in the literature concerning the combined effect of air-entraining agents and other types of concrete admixtures deal primarily only with investigations with superplasticizers [6 to 13].

Concrete with a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt must contain an adequately dense hardened cement paste ($w/c \leq 0.50$), must be manufactured using a freeze-thaw-resistant aggregate and, over and above this – with the exception of dry-packed concretes with $w/c < 0.40$ – must contain an air-entraining agent which generates an adequate content of small air voids in the concrete. This content of small voids is assessed in the hardened concrete [14] or, more recently, also in the unset concrete [15], by determining the L 300 micro-air-void content – all voids up to $300 \mu\text{m}$ – or the spacing factor – a parameter derived from an idealised void system for the distance of a point in the hardened cement paste from the nearest void. Extensive investigations [i.a. 1, 2] have shown that determination of the total air content in unset concrete is sufficiently accurate for demonstrating an adequate content of small voids if a suitable air-entraining agent is used. This total air content must be, for example, at least 4.5% (individual value $\geq 4.0\%$) for a maximum aggregate particle size of 16 mm. The resistance of concrete to freeze-thaw attack with de-icing salt can be more accurately assessed by determining the air-void parameters themselves.

The investigations into the influence of superplasticizers on the air-void parameters and on the resistance of air-entrained concretes [6 to 13] to freeze-thaw with de-icing salt showed a decrease in the content of small air voids $< 300 \mu\text{m}$ and an increase in the content of larger voids $> 500 \mu\text{m}$, for the same total air content. It was concluded from this that small air voids unite to form larger ones because of the effect of superplasticizers. It is suspected that this coalescence of small voids is caused by the defoaming agents present in the superplasticizers and by the dispersive effect of the superplasticizers. This led to the suggestion of requiring a 0.5 to 1.0 vol % higher air content in the unset concrete when superplasticizers are used for concretes which are exposed to freeze-thaw attacks with de-icing salt. Additionally, examination of the air-void parameters in the hardened concrete is required for combined testing of air-entraining agents and superplasticizers [16,17]. So far there has been no systematic investigation of the influence of other admixtures, such as plasticizers and retarders, on the air-void parameters.

3 Purpose of the research work

In the context of this project No. 7424 of the Syndicate of Industrial Research Associations, which was sponsored by funds from the Federal Ministry of Trade and Commerce, the questions examined were: which of the types of admixtures which are frequently added to concrete with a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt might interfere with the distribution of air voids and in so doing impair the resistance to freeze-thaw with de-icing salt, how great this interference is and which measures need to be taken to ensure a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt in air-entrained concrete when such admixtures are used. The intention was also to review the present specifications for the air-void parameters by which a concrete can be assessed for its resistance to freeze-thaw with de-icing salt.

4 Trial procedure

4.1 Basic materials

4.1.1 Cement, aggregate and mixing water

Two Portland cements, one Z 35 F (CEM I 32,5 R) and one Z 45 F (CEM I 42,5 R), which comply with DIN 1164 and have chemical and mineralogical compositions which are average for cements manufactured in Germany were used in the investigations. Coarse Rhine sand in the fractions 0 to 2 mm, 2 to 8 mm and 8 to 16 mm from the Düsseldorf area, and quartz flour of 0 to 0.25 mm and quartz sand of 0 to 1 mm from the Cologne area were used as aggregate. According to details from the delivery company, as well as judging from appearances and a number of check tests, the aggregate complied with the requirements of DIN 4226-1. The particle size composition of the aggregate lay within the range of grading curve A/B 16.

Tafel 1 Luftporenbildner (LP) / Table 1 Air entraining agent (LP)

Typ Type	Anzahl Number	Feststoffgehalt ¹⁾ Solid content %	Wirkstoff ¹⁾ Basic substance	Zugabemenge zur Erhöhung des LP-Gehaltes um 1% Addition to increase the air content by 1% in % von z / in % of c für Beton (Tafel 3) / for concrete (Table 3)							
				3	8	9	11	12 (BV)	15 (FM)	16 (FM)	17 (FM)
				I	5	15–26	Wurzelharz	0,010 bis 0,017	0,011 bis 0,017	0,012 bis 0,017	
II	4	2,2–4,6	Wurzelharz	0,053 bis 0,080			0,13 bis 0,17	0,044 bis 0,103			0,042 bis 0,056
III	1	10	Alkyl- Arylsulfonat	0,028		0,030				0,023	
IV	1	4,8	synthetisches Tensid	0,014							

¹⁾ Angaben der Hersteller und eigene Untersuchungen¹⁾ Declaration by the manufacturer and own tests

z.B. im Betonstraßendeckenbau verwendet werden (Typ I), und 4 mit normalem Feststoffgehalt (Typ II). Hinzu kommen 2 Luftporenbildner auf der Basis synthetischer Tenside, ein schon seit längerer Zeit verwendeter (Typ III) sowie ein neu entwickelter (Typ IV). Tafel 1 enthält die Feststoffgehalte sowie die Zugabemenge, die zur Erhöhung des Luftgehaltes um 1 % bei unterschiedlichen Betonzusammensetzungen notwendig ist.

Tafel 2 enthält die weiteren Betonzusatzmittel. Es wurden 9 Verflüssiger auf der Basis von Ligninsulfonat eingesetzt, 8 mit Entschäumer (Typ A) und 1 speziell für diese Untersuchungen hergestellter ohne Entschäumer (Typ B). Weiterhin wurde 1 Verflüssiger auf der Basis von Naphthalinsulfonat und Acrylat mit Entschäumer (Typ C) verwendet. Von den Fließmitteln waren 3 auf Naphthalinsulfonatbasis, 1 mit Entschäumer (Typ D) und 2 ohne Entschäumer (Typ E) sowie 2 auf Melaminsulfonatbasis (Typ F).

Zusätzlich wurde ein Verzögerer auf der Basis eines nicht entzuckerten Ligninsulfonats mit Entschäumer (Typ X) und ein weiterer auf Phosphatbasis (Typ Y) eingesetzt.

Tafel 2 Verflüssiger (BV), Fließmittel (FM) und Verzögerer (VZ)
Table 2 Plasticizer (BV), Superplasticizer (FM) and Retarder (VZ)

Zusatzmittel Admixtures	Typ Type	Anzahl Number	Feststoffgehalt Solid content Gew.-%	Wirkstoff Basic substance	Entschäumer Defoaming agent
BV	A	8	28–40	Ligninsulfonat	X
BV	B	1	39	Ligninsulfonat	–
BV	C	1	28	Naphthalinsulfonat+Acrylat	X
FM	D	1	28	Naphthalinsulfonat	X
FM	E	2	20	Naphthalinsulfonat	–
FM	F	2	20	Melaminsulfonat	–
VZ	X	1	45	nicht entzuckertes Ligninsulfonat	X
VZ	Y	1	28	Phosphat	–

4.2 Betonzusammensetzung

Die Betonzusammensetzungen gehen aus Tafel 3 hervor. Die Hauptversuche wurden mit den Luftporenbetonen (LP 3), die einen w/z-Wert von 0,50 aufwiesen, durchgeführt. Diesen Betonen wurden die verschiedenen Verflüssiger (LP 12), ein Fließmittel in geringer Dosierung (LP 13) oder Verzögerer (LP 14), zugegeben. Ergänzend wurden LP-Betone (LP 8 und LP 9) hergestellt, die durch Zugabe von unterschiedlichen Fließmitteln so verflüssigt wurden, daß weiche Betone im Bereich der Konsistenz KP (LP 15) und Fließbetone

4.1.2 Concrete admixtures

Nine air-entraining agents based on wood resin (see Table 1) were used, of which 5 had a higher solids content, as used for example in concrete road surface construction (Type I), and 4 had a normal solids content (Type II). Added to these were 2 air-entraining agents based on synthetic surfactants, one of which has been used for some time (Type III) and a newly developed one (Type IV). Table 1 shows the solids content and the amount which needs to be added to raise the air content by 1% for various concrete compositions.

Table 2 contains the other concrete admixtures. Nine lignosulfonate-based plasticizers were used, 8 with defoaming agent (Type A) and one specially produced for these investigations without defoaming agent (Type B). One further plasticizer based on naphthalenesulfonate and acrylate with defoaming agent (Type C) was also used. Of the superplasticizers 3 were based on naphthalenesulfonate, 1 with defoaming agent (Type D) and 2 without defoaming agent (Type E), and 2 were based on melaminesulfonate (Type F).

In addition a retarder based on a non-desugared lignosulfonate with defoaming agent (Type X) and another one based on phosphate (Type Y) were used.

4.2 Concrete composition

The concrete compositions are shown in Table 3. The main trials were carried out with air-entrained concretes (LP 3) which have a w/c ratio of 0.50. The various plasticizers (LP 12), a small amount of superplasticizer (LP 13) or retarder (LP 14) were added to these concretes. Air-entrained concretes (LP 8 and LP 9) were also produced, which were plasticized by the addition of various superplasticizers to produce soft concretes in the KP range of consistency (LP 15) and superplasticized concretes (LP 16). A high early strength free-flowing concrete (LP 17) was produced as road concrete together with the associated basic concrete (LP 11). Concrete 10 was produced with a w/c ratio of 0.40 without an air-entraining agent to establish whether high early strength road concretes without artificially produced air voids also have an adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt. The influence of the consistency on the air-void parameters was investigated by varying both the cement paste content (LP 1, LP 3, LP 6 and LP 7) and the water content for the same cement content (LP 2, LP 3, LP 4 and LP 5).

4.3 Production

The concretes were usually mixed for 2 minutes in a 150 l laboratory pan mixer after the initial materials had been added – the air-entraining agent was added to the mixing water. Then a plasticizer, a superplasticizer or a retarder was added. They were mixed again, for one minute for plasticizers and retarders and 3 minutes for superplasticizers. For some mixtures the time at which the admixtures were added and the mixing time were varied. All test pieces and the air void trial equipment were compacted on the vibration table. The trial

(LP 16) entstanden. Weiterhin wurde als Straßenbeton ein frühhochfester Fließbeton (LP 17) und der zugehörige Ausgangsbeton (LP 11) hergestellt. Zur Klärung, ob frühhochfeste Straßenbetone auch ohne künstlich erzeugte Luftporen einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen, wurde der Beton 10 mit einem w/z-Wert von 0,40 ohne Luftporenbildner hergestellt. Der Einfluß der Konsistenz auf die Luftporenkennwerte wurde durch Variation sowohl des Zementleimgehalts (LP 1, LP 3, LP 6 und LP 7) als auch des Wassergehalts bei gleichem Zementgehalt (LP 2, LP 3, LP 4 und LP 5) untersucht.

4.3 Herstellung

Die Betone wurden in einem 150-l-Labortellermischer nach Zugabe der Ausgangsstoffe – der Luftporenbildner wurde dem Anmachwasser zugegeben – i.d.R. 2 Minuten gemischt. Anschließend wurde ein Verflüssiger, ein Fließmittel oder ein Verzögerer zugegeben. Bei Verflüssigern und Verzögerern wurde 1 Minute und bei Fließmitteln wurde 3 Minuten nachgemischt. Bei einigen Mischungen wurden der Zugabezeitpunkt der Zusatzmittel und die Mischzeit variiert. Alle Prüfkörper und der Luftporentopf wurden auf dem Rütteltisch verdichtet. Die Festbetonprüfkörper lagerten bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern, anschließend 6 Tage unter Wasser und danach bis zur Prüfung 21 Tage im Klimaraum mit rd. 65 % r.F., und zwar stets bei rd. 20 °C. Die 10-cm-Würfel für die Frost-Tausalz-Prüfung wurden vor Beginn der Prüfung 1 Tag in 3%ige NaCl-Lösung eingelagert.

4.4 Prüfungen

4.4.1 Frischbeton

Die Konsistenz aller Betone wurde nach 10 Minuten mit dem Ausbreitmaß, bei sehr steifen Betonen mit dem Verdichtungsmaß, bestimmt. Der Gesamtluftgehalt des Frischbetons wurde im Luftporentopf ermittelt. Bei einigen Mischungen wurden zusätzlich mit dem DBT-Gerät [15] der Abstandsfaktor und der Mikro-Luftporengehalt L 300 am Frischbeton bestimmt.

4.4.2 Festbeton

Rohdichte und Druckfestigkeit wurden nach 2 und 28 Tagen an drei 15-cm-Würfeln geprüft. Die Luftporenverteilung und die Luftporen-

blocks of hardened concrete were stored under damp cloths until they were demoulded after 1 day, then for 6 days under water and afterwards until they were tested for 21 days in an air conditioned room at about 65% relative humidity and at a constant temperature of about 20 °C. The 10 cm cubes for the freeze-thaw with de-icing salt trial were stored in a 3% NaCl solution for 1 day before the start of the trial.

4.4 Trials

4.4.1 Unset concrete

The consistency of all concretes was determined after 10 minutes from the flow diameter or, in the case of very stiff concretes, from the degree of compactability. The total air content of the unset concrete was measured with air void test equipment. The spacing factor and the L 300 micro-air-void content of some mixtures were also determined in the unset concrete using the DBT equipment [15].

4.4.2 Hardened concrete

Bulk density and compressive strength were tested after 2 and 28 days on three 15 cm cubes. The distribution of air voids and the air void parameters were ascertained using the procedures set out in the instructions for the determination of air void parameters in hardened concrete [14]. To determine the resistance to freeze-thaw with de-icing salt two 10 cm cubes were frozen in a 3% NaCl solution after 28 days and thawed out again [18]. One cycle was carried out per day for a total of 100 freeze-thaw cycles.

5 Presentation and discussion of the test results

5.1 Properties of unset concrete, and compressive strength

Judging by appearances, all the concretes had a good cohesive ability without the segregation of large amounts of cement paste or water. Only with the high early strength superplasticized concrete (LP 17) did fairly large quantities of air voids emerge at the surface during production of the test pieces.

The flow diameter of the basic concrete (LP 3) increased by about 4 to 5 cm (LP 12) when plasticizers (BV) were added in quantities of 0.3 to 0.4 % relative to the weight of cement. A considerably greater increase in flow diameter was achieved with superplasticizers (FM)

Tafel 3 Betonzusammensetzung, Konsistenz und Druckfestigkeit
Table 3 Concrete mix design, Consistency and Compressive strength

Beton Concrete	Zement Concrete	Zement- gehalt Cement content kg/m ³	w/z-Wert w/c ratio	Zementleim- gehalt Paste content l/m ³	Zusatz- mittel Admixtures	Ausbreitmaß Flow diameter	Verdichtungs- maß Degree of compactibility cm	Druck- festigkeit Compressive strength N/mm ²	Symbol Symbol
LP 1	PZ 35 F	300	0,50	247	LP	34	–	49	○
LP 2	PZ 35 F	320	0,45	247	LP	–	1,37	50	▽
LP 3	PZ 35 F	320	0,50	263	LP	35÷37	–	39÷50	○
LP 4	PZ 35 F	320	0,55	279	LP	40	–	38	△
LP 5	PZ 35 F	320	0,60	295	LP	52	–	30	△
LP 6	PZ 35 F	340	0,50	280	LP	37	–	44	◇
LP 7	PZ 35 F	360	0,50	296	LP	42	–	42	◇
LP 8	PZ 35 F	330	0,45	255	LP	–	1,30	44÷48	▽
LP 9	PZ 35 F	360	0,45	278	LP	37÷41	–	40÷45	◇
10	PZ 45 F	380	0,40	274	–	–	1,49	74	×
LP 11	PZ 45 F	380	0,40	274	LP	–	1,42÷1,49	65÷70	□
LP 12	PZ 35 F	320	0,50	263	LP+BV	38÷43	–	45÷51	●
LP 13	PZ 35 F	320	0,50	263	LP+FM	42	–	51	◐
LP 14	PZ 35 F	320	0,50	263	LP+VZ	34, 39	–	42, 54	◑
LP 15	PZ 35 F	330	0,45	255	LP+FM	45÷47	–	50÷51	▽
LP 16	PZ 35 F	360	0,45	278	LP+FM	51÷58	–	41÷53	◆
LP 17	PZ 45 F	380	0,40	274	LP+FM	48÷52	–	68÷76	■

kennwerte wurden anhand der in der Anleitung für die Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton [14] festgelegten Vorgehensweise ermittelt. Zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurden zwei 10-cm-Würfel nach 28 Tagen in 3 %iger NaCl-Lösung eingefroren und wieder aufgetaut [18]. Es wurden 1 Wechsel pro Tag und insgesamt 100 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt.

5 Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

5.1 Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeit

Alle Betone hatten nach Augenschein ein gutes Zusammenhaltvermögen, ohne wesentliche Mengen an Zementleim oder Wasser abzusondern. Nur bei dem frühhochfesten Fließbeton (LP 17) wurde bei der Herstellung der Probekörper an der Oberfläche ein stärkeres Austreten von Luftporen bemerkt.

Durch Verflüssiger (BV) wurde bei einer Zugabemenge von 0,3 bis 0,4 %, bezogen auf das Zementgewicht, das Ausbreitmaß des Ausgangsbetons (LP 3) um rd. 4 bis 5 cm (LP 12) vergrößert. Durch Fließmittel (FM) wurde eine wesentlich stärkere Vergrößerung des Ausbreitmaßes erzielt (siehe Tafel 3). Dazu wurden dem LP-Beton 15 2,2 bis 2,5 %, dem LP-Beton 16 1,5 bis 2,1 % und dem LP-Beton 17 4 % Fließmittel, bezogen auf das Zementgewicht, zugegeben.

Die LP-Betone 4 und 5, die mit PZ 35 F und einem w/z-Wert von 0,55 und 0,60 hergestellt wurden, erreichten in etwa die Festigkeit eines B 35. Die Betone, die mit PZ 45 F und einem w/z-Wert von 0,40 hergestellt wurden, erreichten mit und ohne Zugabe von Fließmitteln (LP 17, LP 18 bzw. LP 10, LP 11) mindestens die Festigkeit eines B 55 (siehe Tafel 3). Die Betone mit Verzögerern (LP 14) wiesen mit 8,5 und 18,5 N/mm² eine geringere 2-Tage-Festigkeit auf als die vergleichbaren Luftporenbetone (LP 3) mit einer mittleren 2-Tage-Festigkeit von 25 N/mm².

5.2 Einflüsse auf die Luftporenbildung

5.2.1 Luftporenbildner

Die am Festbeton ermittelte Luftporenverteilung wurde normiert, indem der zu jeder Porenklasse gehörende Luftporengehalt durch den am Festbeton bestimmten Gesamtluftporengehalt geteilt wurde. Die Versuchsergebnisse bestätigen, daß mit Luftporenbildnern des Typs I (siehe Tabelle 1) auf der Basis von Wurzelharz sehr günstige Luftporenverteilungen erreicht werden, während mit Luftporenbildnern auf der Basis bisher überwiegend eingesetzter synthetischer Tenside vom Typ III ungünstigere Luftporenverteilungen erzielt werden (siehe Bild 1a). Neu entwickelte Luftporenbildner auf der Basis anderer synthetischer Tenside vom Typ IV zeigten in einem Tastversuch eine günstigere, ebenfalls in Bild 1a dargestellte Luftporenverteilung. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Betonzusammensetzungen und Herstellungsbedingungen sind notwendig, um dieses letztgenannte Ergebnis abzusichern.

Ein systematischer, baupraktisch relevanter Einfluß des Feststoffgehalts der Luftporenbildner (Typ I und Typ II) auf die Luftporenverteilung konnte bei gleichem Luftgehalt des Frischbetons in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden, allerdings sind, wie Tafel 1 zeigt, wegen des niedrigeren Feststoffgehalts bei Luftporenbildnern des Typs II entsprechend höhere Dosierungen zur Erzielung des gleichen Gesamtluftgehaltes erforderlich.

5.2.2 Konsistenz des Frischbetons

Um zu klären, inwieweit Verflüssiger und Fließmittel durch den in ihnen enthaltenen Entschäumer oder durch ihre dispergierende Wirkung die Luftporenkennwerte beeinflussen, wurde zunächst der Einfluß der Konsistenz auf die Luftporenkennwerte von Betonen ohne verflüssigende Zusatzmittel untersucht. Hierzu wurde die Frischbetonkonsistenz des Betons einmal durch Anhebung des w/z-Wertes (LP 2 bis LP 5) und zum anderen durch Erhöhung des Zementleimgehaltes von rd. 250 bis 300 l/m³ bei gleichem w/z-Wert (LP 3, LP 6 und LP 7) geändert. Zur Erzielung des gleichen Gesamtluftgehaltes von rd. 4,5 bis 5 % ist bei größerem w/z-Wert eine etwas geringere Luftporenbildnermenge erforderlich.

Bild 1b zeigt, daß sich die Luftporenverteilung bei gleichem Gesamtluftgehalt mit größer werdendem w/z-Wert hin zu weniger feinen Poren und damit hin zu mehr Poren > 300 µm verschiebt. Kleinere Poren werden offensichtlich nicht mehr so gut zwischen den Feinst-

(see Table 3). This was demonstrated by adding 2.2 to 2.5% superplasticizer relative to the weight of cement to LP concrete 15, 1.5 to 2.1% to LP concrete 16, and 4% to LP concrete 17.

The LP concretes 4 and 5, which were manufactured with PZ 35 F Portland cement and a w/c ratio of 0.55 and 0.60, reached approximately the strength of a B 35 concrete. The concretes which were produced with PZ 45 F Portland cement and a w/c ratio of 0.40, with and without the addition of superplasticizers (LP 17, LP 18 and LP 10, LP 11 respectively), reached at least the strength of a B 55 concrete (see Table 3). The concretes with retarders (LP 14) showed lower 2 day strengths – 8.5 and 18.5 N/mm² – than the comparable air-entrained concretes (LP 3) with an average 2 day strength of 25 N/mm².

5.2 Factors affecting the formation of voids

5.2.1 Air-entraining agents

The distribution of air voids measured in the hardened concrete was standardized by dividing the content of air voids belonging to each class of voids by the total content of air voids found in the hardened concrete. The test results confirm that very favourable air voids distributions are achieved with Type I air-entraining agents (see Table 1) based on wood resin, while less favourable air voids distributions are attained with air-entraining agents based on Type III synthetic surfactants, which have been used predominantly so far (see Fig. 1a). In a preliminary test the newly developed Type IV air-entraining agents based on other synthetic surfactants showed a more favourable distribution of air voids, also shown in Fig. 1a. Further investigations with different concrete compositions and production conditions are needed to confirm this last result.

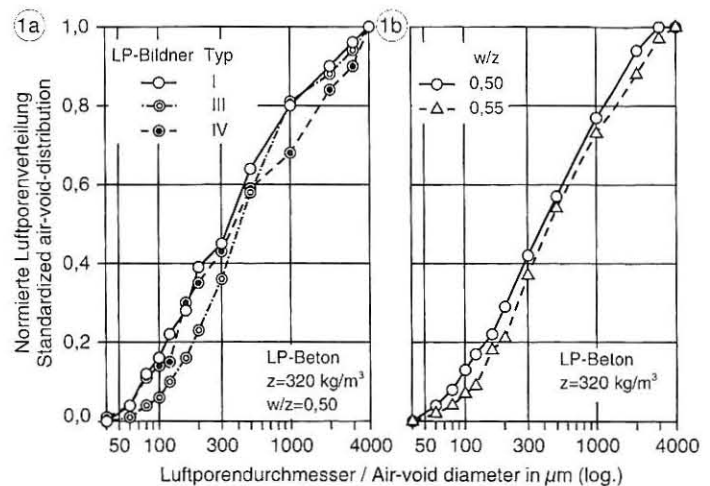


Bild 1 Luftporenverteilung von
a) Luftporenbetonen mit unterschiedlichen Luftporenbildnern
b) Luftporenbetonen mit unterschiedlichen w/z-Werten

Fig. 1 Air-void distribution of
a) air-entrained concretes with different air entraining agents
b) air-entrained concretes with different w/c ratios

These investigations were not able to establish that the solids content in the air-entraining agents (Type I and Type II) had any systematic influence relevant to building practice on the distribution of air voids in unset concrete with the same air content. However, because Type II air-entraining agents have lower solids contents, correspondingly higher amounts are required to achieve the same total air content, as shown in Table I.

5.2.2 Consistency of unset concrete

The influence of consistency on the air void parameters of concretes without plasticizing admixtures was investigated first in order to establish the extent to which plasticizers and superplasticizers influence the air void parameters because of the defoaming agents they contain or because of their dispersive action. For this purpose the consistency of the unset concrete was changed, firstly by raising the w/c ratio (LP 2 to LP 5) and secondly by increasing the cement paste

mörtelpartikeln eingeschlossen oder von ihnen festgehalten und vereinigen sich zu größeren. Auch die Änderung der Konsistenz durch Erhöhung des Zementleimgehaltes führte zu einer Verschiebung der Luftporenverteilung hin zu größeren Poren. Diese Änderung der Luftporenverteilung ist jedoch geringer ausgeprägt als bei der Anhebung des w/z-Wertes, denn es wird nur die Menge, nicht aber die stoffliche Zusammensetzung des Zementleims geändert.

5.2.3 Verflüssiger, Fließmittel

5.2.3.1 Vorbemerkung

Verflüssiger und Fließmittel beeinflussen bei Luftporenbetonen sowohl die für den notwendigen Gesamtluftgehalt erforderliche Menge an Luftporenbildner als auch die sich einstellende Luftporenverteilung im Beton. Dieser Einfluß geht zum einen auf die dispergierende Wirkung verflüssigender Zusatzmittel und zum anderen auf die Wirkung von Entschäumern zurück, die bei den meisten Verflüssigern und bei einigen Fließmitteln zugegeben werden.

5.2.3.2 Erforderliche Luftporenbildermenge

Die zur Erzielung des notwendigen Gesamtluftgehalts erforderliche Menge an Luftporenbildnern ist in Tafel 1 zusammengestellt. Bei einer moderaten Verflüssigung, d.h. einer Erhöhung des Ausbreitmaßes um etwa 4 bis 5 cm des LP-Beton 12, mußte zur Erzie-

lung des notwendigen Gesamtluftgehalts erforderliche Menge an Luftporenbildnern ist in Tafel 1 zusammengestellt. Bei einer moderaten Verflüssigung, d.h. einer Erhöhung des Ausbreitmaßes um etwa 4 bis 5 cm des LP-Beton 12, mußte zur Erzie-

lung des notwendigen Gesamtluftgehalts erforderliche Menge an Luftporenbildnern ist in Tafel 1 zusammengestellt. Bei einer moderaten Verflüssigung, d.h. einer Erhöhung des Ausbreitmaßes um etwa 4 bis 5 cm des LP-Beton 12, mußte zur Erzie-

5.2.3 Plasticizers, superplasticizers

5.2.3.1 Preliminary note

Plasticizers and superplasticizers in air-entrained concretes influence both the amount of air-entraining agent required for the necessary total air content and the distribution of air voids which occurs in the concrete. This influence is attributable on the one hand to the dispersive action of plasticizing admixtures and on the other to the action of defoaming agents, which are added to most plasticizers and to some superplasticizers.

5.2.3.2 Amount of air-entraining agent required

The amounts of air-entraining agents required to achieve the necessary total air content are listed in Table 1. With moderate plasticizing, i.e. when the flow diameter of LP concrete 12 is raised by about 4 to 5 cm, approximately the same amount of Type I or II air-entraining agent had to be used to achieve the specified total air content, as with the reference concrete without plasticizer (LP 3) where lignosulfonate with defoaming agent (Type A) was used as the plasticizer. If a plasticizer based on lignosulfonate without a defoaming agent (Type B) was used then the required amount of air-entraining agent decreased slightly. When a naphthalenesulfonate-based plasticizer with defoaming agent (Type C) or a small amount of superplasticizer based on the same active ingredient (Type E) was added (LP 13) there was an increase in the amount of air-entraining agent needed to achieve the required total air content. On the basis of these trials, and also as known from the literature [7,8], it is to be assumed that lignosulfonates introduce larger air voids into the concrete, even when they contain a defoaming agent.

With a stronger plasticizing effect caused by a superplasticizer, for example with LP concretes 15 and 16, the amount of air-entraining agent added to achieve a given total air content could be decreased slightly in comparison with the basic non-plasticized concretes (LP 8 and LP 9). This tendency towards a decrease in the required amount of additive was reinforced with increasing plasticizing of the concretes. The amount of air-entraining agent required for the strongly plasticized, low-water, air-entrained concrete 17, which has a low w/c ratio, was only a third of the amount required for the basic concrete (LP 11).

5.2.3.3 Distribution of air voids

The distribution of air voids in the concretes changed towards coarser voids when the flow diameter was raised by about 4 to 5 cm by means of a plasticizer (Fig. 2a). Comparison of Figs. 1b and 2a shows that as a result of this moderate plasticizing effect a similar air voids distribution occurred as when the w/c ratio was raised from 0.50 to 0.55 and that the number of air voids < 100 µm in air-entrained concrete with plasticizers was even a little lower. The distribution of air voids in the concretes with two different lignosulfonate-based plasticizers was about the same (Fig. 2b), although one plasticizer was defoamed (Type A) and the other was not (Type B). The proportion of voids up to 100 µm was, however, slightly smaller in the concrete which contained a plasticizer with defoaming agent.

The air voids distribution in the concrete with the naphthalenesulfonate-based plasticizer (Type C), compared with that of the basic concrete, deteriorated only in the range of voids < 100 µm (Fig. 2c). The air voids distribution in the concrete with the superplasticizer with the same basis (Type D) was no different from the basic concrete (see Fig. 2d).

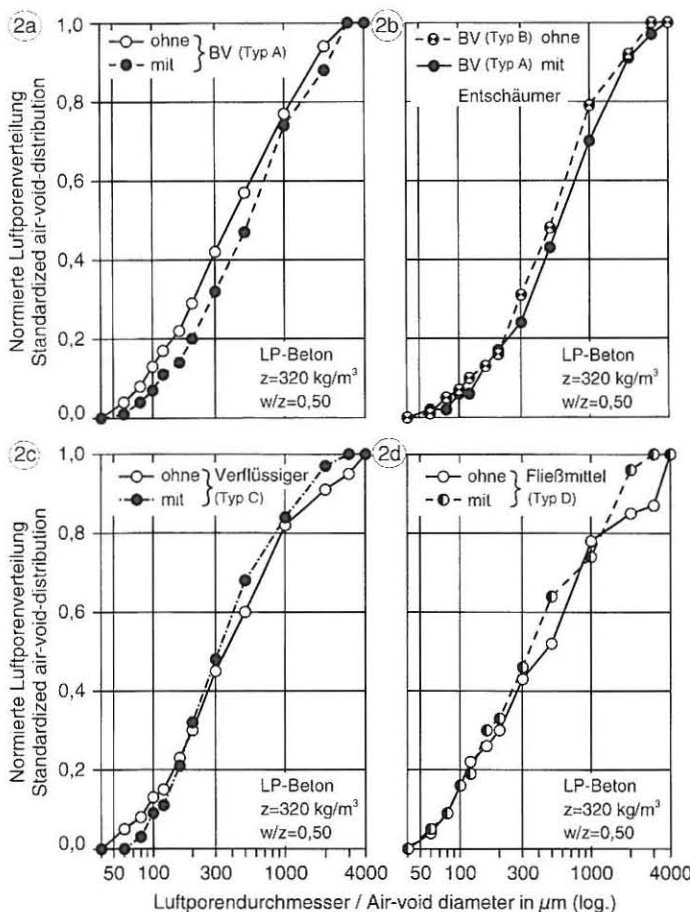


Bild 2 Luftporenverteilung von
a) Luftporenbetonen ohne und mit Verflüssiger (Typ A)
b) Luftporenbetonen mit Verflüssigern ohne (Typ B) und mit Entschäumer (Typ A)
c) Luftporenbetonen ohne und mit Verflüssiger (Typ C)
d) Luftporenbetonen ohne und mit Fließmittel (Typ D) (geringe Dosierung)

Fig. 2 Air-void distribution of
a) air-entrained concretes without and with plasticizer (type A)
b) air-entrained concretes with plasticizer without (type B) and with (type A) defoaming agent
c) air-entrained concretes without and with plasticizer (type C)
d) air-entrained concretes without and with superplasticizer (type D) (small amount)

lung des vorgegebenen Gesamtluftgehaltes etwa die gleiche Menge eines Luftporenbildners vom Typ I bzw. II verwendet werden wie beim Vergleichsbeton ohne Verflüssiger (LP 3), wenn als Verflüssiger Ligninsulfonat mit Entschäumer (Typ A) verwendet wurde. Bei Einsatz eines Verflüssigers auf der Basis von Ligninsulfonat ohne Entschäumer (Typ B) verringerte sich die erforderliche Luftporenbildnermenge geringfügig. Wurde ein Verflüssiger auf der Basis von Naphthalinsulfonat mit Entschäumer (Typ C) oder ein Fließmittel auf der gleichen Wirkstoffbasis (Typ E) mit geringer Dosierung zugegeben (LP 13), erhöhte sich die zur Erzielung des erforderlichen Gesamtluftgehaltes notwendige Luftporenbildnermenge. Aufgrund dieser Versuche ist, wie auch aus der Literatur bekannt [7, 8], zu vermuten, daß Ligninsulfonate größere Luftporen in den Beton selbst dann einführen, wenn sie einen Entschäumer enthalten.

Bei stärkerer Verflüssigung durch ein Fließmittel, wie z.B. bei den LP-Betonen 15 und 16, konnte die Zugabemenge des Luftporenbildners zur Erzielung eines vorgegebenen Gesamtluftgehaltes im Vergleich zu den nicht verflüssigten Ausgangsbetonen (LP 8 und LP 9) etwas verringert werden. Diese Tendenz der Verringerung der erforderlichen Zugabemenge verstärkte sich mit zunehmender Verflüssigung der Betone. Die erforderliche Luftporenbildnermenge betrug bei dem stark verflüssigten wasserarmen Luftporenbeton 17 mit geringem w/z-Wert nur noch ein Drittel der Menge, die für den Ausgangsbeton (LP 11) erforderlich war.

5.2.3.3 Luftporenverteilung

Die Luftporenverteilung der Betone, deren Ausbreitmaß durch einen Verflüssiger um etwa 4 bis 5 cm angehoben wurde, veränderte sich hin zu größeren Poren (Bild 2a). Ein Vergleich der Bilder 1b und 2a zeigt, daß sich infolge dieser moderaten Verflüssigung eine ähnliche Luftporenverteilung einstellt wie infolge einer Erhöhung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,55, wobei die Anzahl der Poren < 100 µm bei Luftporenbeton mit Verflüssigern noch etwas geringer ausfiel. Die Luftporenverteilungen der Betone mit zwei unterschiedlichen Verflüssigern auf der Basis von Ligninsulfonat waren in etwa gleich (Bild 2b), obwohl ein Verflüssiger entschäumt (Typ A) und der andere nicht entschäumt war (Typ B). Der Anteil an Poren bis zu 100 µm war jedoch bei dem Beton, der einen Verflüssiger mit Entschäumer enthielt, geringfügig kleiner.

Die Luftporenverteilung des Betons mit dem Verflüssiger auf Naphthalinsulfonatbasis (Typ C) wurde nur im Bereich der Poren < 100 µm gegenüber der des Ausgangsbetons verschlechtert (Bild 2c). Die Luftporenverteilung des Betons mit dem Fließmittel auf gleicher Basis (Typ D) unterschied sich nicht vom Ausgangsbeton (siehe Bild 2d).

Eine deutlichere Verschlechterung der Luftporenverteilung ergab sich bei stärkerer Verflüssigung durch ein Fließmittel (LP 15 und LP 16; siehe Bild 3a). Die sehr starke Verflüssigung für den Fließbeton mit geringem w/z-Wert (LP 17) führte, wie Bild 3b zeigt, im Vergleich zum Ausgangsbeton ohne Fließmittel (LP 11) zu einer sehr ungünstigen Luftporenverteilung. Auch eine Erhöhung des Gesamtluftgehaltes des Frischbetons auf über 6 % führte zu keinem ausreichenden Gehalt an kleinen Poren. Inwieweit neu entwickelte Luftporenbildner [24] auf der Basis synthetischer Tenside auch in Kombination mit Fließmitteln zu einer günstigen Luftporenverteilung bei stark verflüssigten Betonen führen, muß noch näher geklärt werden.

Aus den Untersuchungen mit Verflüssigern und Fließmitteln geht hervor, daß sich die Luftporenverteilung mit zunehmender Verflüssigung des Frischbetons hin zu größeren Poren verschiebt. Es entstehen weniger Poren unterhalb und mehr Poren oberhalb von 300 µm. Der Gehalt an Poren bis zu 100 µm wird prozentual etwas stärker verringert als der Mikro-Luftporengehalt L 300. Dies kann auf die dispergierende Wirkung von Verflüssigern und Fließmitteln zurückgeführt werden, wenn durch eine Disagglomeration der Zementpartikel auch kleinere Poren destabilisiert werden. Diese Wirkung ist stärker als die Wirkung einer vergleichbaren Verflüssigung durch Wasserzugabe.

Der Einfluß unterschiedlicher Wirkstoffe der Verflüssiger und Fließmittel auf die Luftporenverteilung läßt sich wie folgt beschreiben. Verflüssiger auf der Basis von Ligninsulfonaten führen in den Beton, auch wenn sie Entschäumer enthalten, größere Poren ein. Die eingeführten größeren Poren führen zu einer Luftporenverteilung, die bei vorgegebenem Luftgehalt etwas ungünstiger ist als die eines Betons gleicher Konsistenz ohne Verflüssiger. Durch Entschäumer scheint die destabilisierende Wirkung auf sehr kleine Poren verstärkt

A more significant deterioration in the distribution of air voids occurred with stronger plasticizing with a superplasticizer (LP 15 and LP 16; see Fig. 3a). The very strong plasticizing for the superplasticized concrete with low w/c ratio (LP 17) led, as Fig. 3b shows, to a very unfavourable distribution of air voids when compared to the basic concrete without superplasticizer (LP 11). Even raising the total air content in the unset concrete to over 6% did not lead to an adequate content of small voids. How far newly developed air-entraining agents (24) based on synthetic surfactants lead to a favourable distribution of air voids in strongly plasticized concretes if combined with superplasticizers still needs to be more carefully clarified.

From the investigations with plasticizers and superplasticizers it emerges that the distribution of air voids shifts towards larger voids with increasing plasticizing of the unset concrete. Fewer voids occur below 300 µm and more above. On a percentage basis, the content of voids up to 100 µm decreases rather more sharply than the L 300 micro-air-void content. This can be attributed to the dispersive effect of plasticizers and superplasticizers, even though smaller voids are destabilized by disagglomeration of the cement particles. This effect is stronger than the effect of comparable plasticizing caused by adding water.

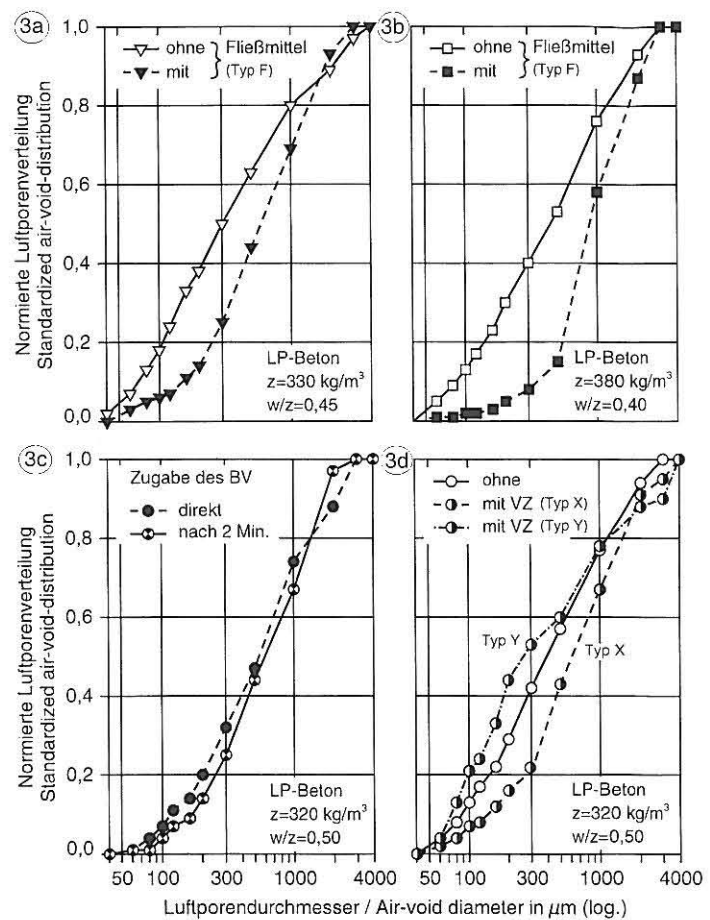


Bild 3 Luftporenverteilung von
a) Luftporenbetonen ohne und mit starker Verflüssigung durch Fließmittel
b) frühhochfesten Luftporenbetonen ohne und mit sehr starker Verflüssigung durch Fließmittel (frühhochfester Fließbeton)
c) Luftporenbetonen mit Verflüssigern; Verflüssigerzugabe sofort und nach 2 Minuten
d) Luftporenbetonen ohne und mit Verzögerer

Fig. 3 Air-void distribution of
a) air-entrained concretes without and with heavy plasticizing by superplasticizer
b) high early strength air-entrained concretes without and with very heavy plasticizing by superplasticizer (high early strength flowing concrete)
c) air-entrained concretes with plasticizer; plasticizer addition: immediately and after 2 minutes
d) air-entrained concretes without and with retarders

zu werden. Verflüssiger auf Naphthalinsulfonatbasis führen im allgemeinen keine Poren ein.

Zwischen der Luftporenverteilung eines Betons mit Fließmittel ohne Entschäumer auf Naphthalinsulfonatbasis und auf Melaminsulfonatbasis konnte in diesen Untersuchungen kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Der Zugabezeitpunkt der Verflüssiger und Fließmittel und die Mischdauer haben einen wesentlichen Einfluß auf die Luftporenverteilung. Werden Verflüssiger und Luftporenbildner dem Anmachwasser zusammen zugegeben, so entstehen weniger kleine Poren, als wenn die Zugabe des Luftporenbildners mit dem Anmachwasser erfolgt und der Verflüssiger bzw. das Fließmittel nach einer, besser zwei Minuten Mischzeit zugegeben wird (siehe Bild 3c). Entscheidend für die Entstehung eines stabilen Luftporensystems ist in jedem Fall eine ausreichende Mischdauer des Betons mit dem Luftporenbildner.

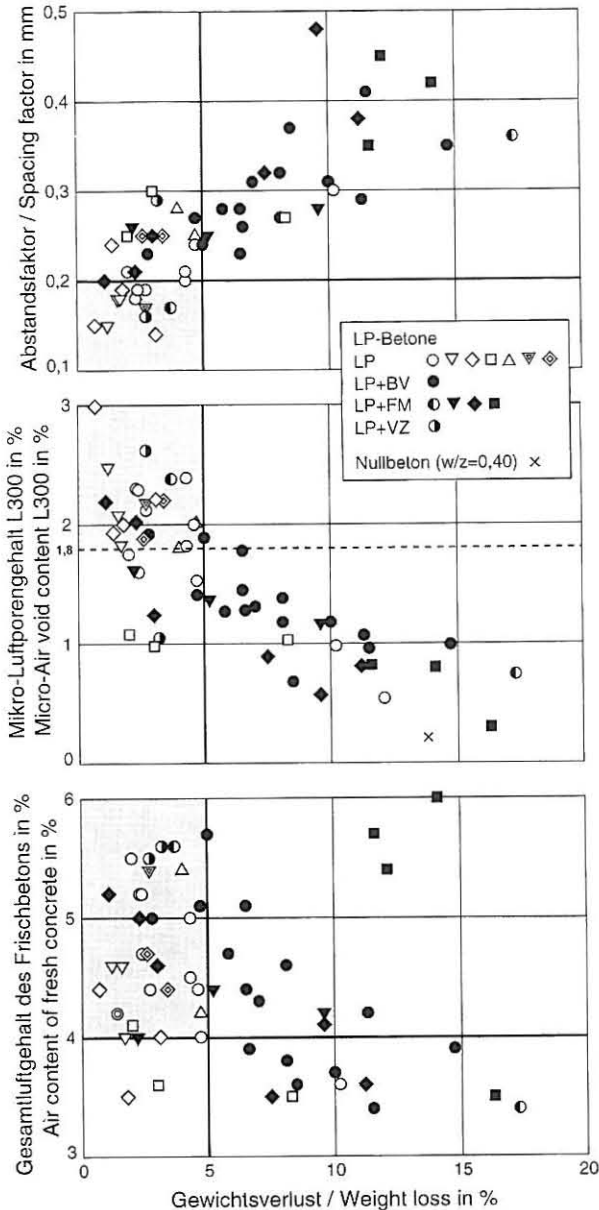


Bild 4 Gewichtsverlust als Maß für den Frost-Tausalz-Widerstand in Abhängigkeit vom

- Abstandsfaktor (oben)
- Mikro-Luftporengehalt L 300 (Mitte)
- Gesamtluftgehalt des Frischbetons (unten)

Fig. 4 Weight loss as a measure of the resistance to freeze-thaw with de-icing salt, as a function of the

- spacing factor (top)
- micro-air-void content L 300 (middle)
- air content of the unset concrete (bottom)

The influence of different active ingredients in the plasticizers and superplasticizers on the distribution of air voids can be described as follows. Plasticizers based on lignosulfonates introduce larger voids into the concrete, even if they contain defoaming agents. These larger voids lead to an air voids distribution which, with a given air content, is rather less favourable than that in a concrete of the same consistency without plasticizer. With defoaming agents the destabilizing effect on very small voids appears to be increased. Naphthalenesulfonate-based plasticizers do not generally introduce any voids.

These investigations did not show any significant differences between the air voids distribution in a concrete with superplasticizer without defoaming agent based on naphthalenesulfonate and one based on melaminesulfonate.

The times at which the plasticizers and superplasticizers are added and the length of the mixing time have a considerable influence on the distribution of air voids. If plasticizers and air-entraining agents are added to the mixing water at the same time then fewer small voids occur than if the air-entraining agent is added with the mixing water and the plasticizer or superplasticizer is added after one, or preferably, two minutes of mixing time (see Fig. 3c). In any case it is essential that the concrete is mixed with the air-entraining agent for an adequate length of time if a stable air voids system is to develop.

5.2.4 Retarder

The amount of air-entraining agent required to achieve a given total air content of around 4.5 to 5% was about the same when a retarder (LP 14) was added as with the basic concrete (LP 3). The type of retarder (X or Y) had no influence on this either.

The addition of retarders did however have an influence on the distribution of air voids in the air-entrained concretes. The retarder based on a desugared lignosulfonate with defoaming agent (Type X) had a similarly negative influence on the distribution of air voids to the plasticizers based on the same active ingredient. However, the number of small voids actually increased when compared with the initial concrete without retarder, on adding the phosphate-based retarder (Type Y) which does not have a plasticizing effect (see Fig. 3d). Further investigations will be needed to clarify whether this result can be generalized.

5.3 Resistance to freeze-thaw with de-icing salt

Resistance to freeze-thaw with de-icing salt was investigated by the cube method to discover the extent to which it is affected by the changes in the distribution of air voids. Experience shows that a concrete is considered to be adequately resistant if the weight loss after 100 freeze-thaw cycles does not exceed 5% [21]. Fig. 4 below shows that with w/c ratios of up to 0.60 an adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt is achieved with the total air content of at least 4% (16 mm individual value for maximum grain size) required by DIN 1045 for air-entrained concrete without the addition of further admixtures. On the other hand, if plasticizers and superplasticizers are used the air content must be raised to at least 5%. The unfavourable shift in the distribution of air voids in the range of voids up to a diameter of 300 µm, which can already be seen in LP concretes which have been normally plasticized with plasticizers, has meant that a micro-air-void content of at least 1.8 is required (see Fig. 4, middle).

Where there is very strong plasticizing, which is usually only necessary for high early strength superplasticized concretes, even the total air content of 5% for an air-entrained concrete is not adequate. Whether this is due solely to a marked coalescence of small voids or whether, as seen in [20], segregation within the fine mortar has an influence, did not become absolutely clear from these investigations. With superplasticized air-entrained concretes which have little water and are therefore of high early strength the required plasticizing effect therefore has to be achieved not only by the type and amount of the superplasticizer, but also by the amount and particle size composition of the very fine particles. The air void parameters for these very heavily plasticized LP concretes must always be determined by performance testing. The extent to which newly developed air-entraining agents [24] lead to an adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt in heavily plasticized concretes still needs to be examined.

Even a very dense concrete (LP 10) with w/c ratio = 0.40 is not adequately resistant to freeze-thaw with de-icing salt without the addi-

5.2.4 Verzögerer

Die erforderliche Luftporenbildermenge zur Erzielung eines vorgegebenen Gesamtluftgehaltes von rd. 4,5 bis 5 % war bei Zugabe eines Verzögerers (LP 14) in etwa gleich groß wie bei dem Ausgangsbeton (LP 3). Auch der Typ des Verzögerers (X oder Y) hatte hierauf keinen Einfluß.

Die Zugabe der Verzögerer hatte jedoch einen Einfluß auf die Luftporenverteilung der LP-Betone. Während der Verzögerer auf der Basis eines entzuckerten Ligninsulfonats mit Entschäumer (Typ X) die Luftporenverteilung ähnlich negativ beeinflusste wie die Verflüssiger auf der gleichen Wirkstoffbasis, wurde die Anzahl der kleinen Poren bei Zusatz des Verzögerers auf der Basis von Phosphat (Typ Y), der nicht verflüssigend wirkte, gegenüber dem Ausgangsbeton ohne Verzögerer sogar erhöht (siehe Bild 3d). Weitere Untersuchungen müssen klären, ob dieses Ergebnis verallgemeinert werden kann.

5.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Zur Klärung der Frage, inwieweit die dargestellten Änderungen der Luftporenverteilung den Frost-Tausalz-Widerstand beeinflussen, wurde der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem Würfelverfahren untersucht. Erfahrungsgemäß gilt ein Beton als ausreichend widerstandsfähig, wenn der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln 5 % nicht übersteigt [21]. Bild 4 unten zeigt, daß mit dem in DIN 1045 geforderten Gesamtluftgehalt von mindestens 4 % (Einzelwert für Größtkorn 16 mm) für Luftporenbeton ohne Zugabe weiterer Zusatzmittel bei w/z-Werten bis zu 0,60 ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erzielt wird. Bei Verwendung von Verflüssigern und Fließmitteln muß dagegen der Luftgehalt auf mindestens 5 % angehoben werden. Die bereits bei durch Verflüssiger normal verflüssigten LP-Betonen zu beobachtende ungünstige Verschiebung der Luftporenverteilung im Bereich von Poren bis zu einem Durchmesser von 300 µm hat zur Folge, daß ein Mikro-Luftporengehalt von mindestens 1,8 gefordert werden muß (siehe Bild 4 Mitte).

Bei sehr starker Verflüssigung, wie sie im allgemeinen nur für frühhochfeste Fließbetone notwendig wird, reicht auch der Gesamtluftgehalt von 5 % eines LP-Betons nicht aus. Ob nur ein ausgeprägtes Zusammenfließen kleiner Poren hierfür verantwortlich ist oder ob, wie in [20] beobachtet, Entmischungen innerhalb des Feinmörtels einen Einfluß haben, ließ sich bei diesen Untersuchungen nicht eindeutig klären. Bei wasserarmen und damit frühhochfesten LP-Fließbetonen muß deshalb die angestrebte Verflüssigung nicht nur durch Art und Menge des Fließmittels, sondern auch durch Menge und Kornaufbau des Feinstkorns erzielt werden. Die Luftporenkennwerte sind bei diesen sehr stark verflüssigten LP-Betonen immer in der Eignungsprüfung zu bestimmen. Inwieweit neu entwickelte Luftporenbildner [24] zu einem ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand stark verflüssigter Betone führen, muß geprüft werden.

Auch ein sehr dichter Beton (LP 10) mit w/z-Wert = 0,40 ist ohne Zugabe von LP-Bildnern und damit ohne einen ausreichenden Gehalt an kleinen Poren nicht ausreichend frost-tausalz-widerstandsfähig. Hierfür müßte der w/z-Wert weiter auf < 0,35 gesenkt und u.U. Silikastaub zugesetzt werden [23].

Auffallend ist, daß der LP-Beton mit Zusatz eines Verzögerers auf der Basis eines nicht entzuckerten Ligninsulfonats (Beton 14) trotz eines nicht ausreichenden Mikro-Luftporengehalts L 300 von nur 1,05 % einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweist. Inwieweit die Luftporenverteilung von Poren bis zu einem Durchmesser von 100 µm oder eine zusätzliche Hydrophobierung der Luftporen [22] hierbei eine Rolle spielt, muß durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Die Untersuchungen deuten darauf hin, daß mit dem Abstandsfaktor der Frost-Tausalz-Widerstand (siehe Bild 4 oben) nicht so gut abgeschätzt werden kann wie mit dem Mikro-Luftporengehalt L 300. Wird jedoch bei der Eignungsprüfung von LP-Beton der Abstandsfaktor bestimmt, so sollte ein Wert von 0,20 nicht überschritten werden.

5.4 Prüfverfahren

Die Untersuchungen haben bestätigt, daß der Frost-Tausalz-Widerstand am zuverlässigsten anhand des Mikro-Luftporengehalts L 300 beurteilt werden kann, dessen Ermittlung am Festbeton aufwendig

ion of air-entraining agents and thus without an adequate content of small voids. To achieve this the w/c ratio would have to be further decreased to < 0.35 and in some cases silica fume would have to be added [23].

It is noticeable that the air-entrained concrete with added retarder based on a non-desugared lignosulfonate (concrete 14) has an adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt in spite of an inadequate L 300 micro-void content of only 1.05%. How far the distribution of air voids of voids up to a diameter of 100 µm or an added water repellency of the air voids [22] plays a part in this will have to be clarified by further investigations.

The investigations indicate that the resistance to freeze-thaw with de-icing salt (see Fig. 4, top) can be less successfully estimated with the spacing factor than with the L 300 micro-air-void content. If, however, the spacing factor is determined during performance testing for air-entrained concrete, it should not exceed a value of 0.20.

5.4 Trial procedure

The investigations have confirmed that resistance to freeze-thaw with de-icing salt can be assessed most reliably by means of the L 300 micro-air-void content, measurement of which in hardened concrete is costly and often comes too late. Assessment in unset concrete using the DBT equipment has therefore also been investigated at the Research Institute for some concretes with plasticizers and superplasticizers. Details can be found in [15]. In Fig. 5 the L 300 micro-air-void content, which was measured in the hardened concrete, is plotted against that measured with the DBT equipment in the unset concrete. The agreement is satisfactory.

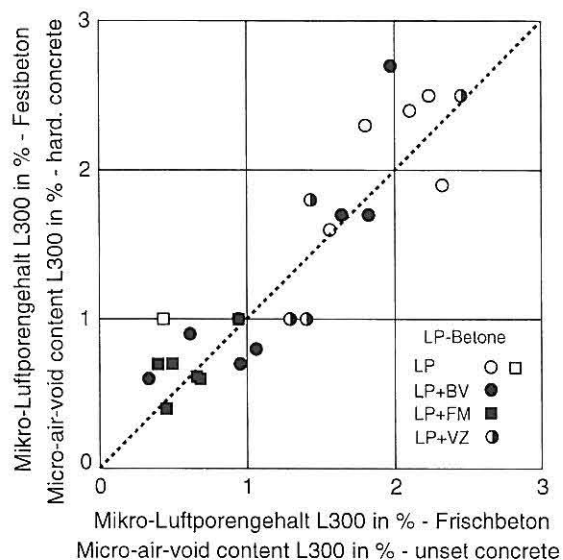


Bild 5 Abhängigkeit zwischen Mikro-Luftporengehalt L 300 des Festbetons und dem des Frischbetons

Fig. 5 Relation between the micro-air-void content L 300 of the hardened concrete and that of the unset concrete

6 Summary and practical consequences

Concretes with high resistance to freeze-thaw with de-icing salt need an adequate content of small voids generated by air-entraining agents. With stiff concretes without the addition of plasticizers, superplasticizers, or retarders these voids are generally held stably in the fine mortar, provided the unset concrete has an adequate air content. Stable fixation of small voids is not always guaranteed with softer concretes, especially if they contain plasticizers or superplasticizers. This problem was examined in the Research Institute. The investigations led to the following results:

6.1 For a given total air content in the fresh concrete, soft concretes with air-entraining agents and without any other admixtures contain fewer voids < 300 µm than stiff concretes. However, this causes only a negligible deterioration in the resistance to freeze-thaw with de-icing salt which can be disregarded in practical terms.

ist und häufig zu spät kommt. Die Bestimmung am Frischbeton mit dem DBT-Gerät wurde deshalb im Forschungsinstitut auch für einige Betone mit Verflüssigern und Fließmitteln untersucht. Einzelheiten können [15] entnommen werden. In Bild 5 ist der Mikro-Luftporengehalt L 300, der am Festbeton bestimmt wurde, aufgetragen über dem am Frischbeton mit dem DBT-Gerät bestimmten. Die Übereinstimmung ist zufriedenstellend.

6 Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis

Betone mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand benötigen einen ausreichenden Gehalt an kleinen, durch Luftporenbildner erzeugten Poren. Bei steifen Betonen ohne Zusatz von Verflüssigern, Fließmitteln oder Verzögerern werden diese Poren bei ausreichendem Luftgehalt des Frischbetons im allgemeinen stabil in den Feinmörtel eingebunden. Bei weicheren Betonen, insbesondere wenn sie Verflüssiger oder Fließmittel enthalten, ist eine stabile Einbindung kleiner Poren nicht immer sichergestellt. Den dafür verantwortlichen Zusammenhängen wurde im Forschungsinstitut nachgegangen. Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen:

6.1 Weiche Betone mit Luftporenbildnern ohne weitere Zusatzmittel enthalten bei dem für LP-Betone geforderten Gesamtluftgehalt weniger kleine Poren $< 300 \mu\text{m}$ als steifere Betone. Der Frost-Tausalz-Widerstand wird hierdurch jedoch nur geringfügig, für die Praxis vernachlässigbar, beeinflusst.

6.2 Wird ein Beton durch Verflüssiger oder Fließmittel verflüssigt, verschiebt sich die Luftporenverteilung hin zu größeren Poren, und zwar um so mehr, je größer die verflüssigende Wirkung ist. Ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand ist in diesem Fall nur dann gegeben, wenn der Gesamtluftgehalt durch eine entsprechend höhere Dosierung des Luftporenbildners angehoben wird.

6.3 Der Gesamtluftgehalt des Frischbetons von weichen Luftporenbetonen und von LP-Betonen, die Verflüssiger oder Fließmittel enthalten, muß deshalb um 1 % gegenüber den Werten der DIN 1045 angehoben werden. Werden bei der Eignungsprüfung die Luftporenkennwerte ermittelt, so muß der Abstandsfaktor $\leq 0,20 \text{ mm}$ und der Mikro-Luftporengehalt $L 300 \geq 1,8 \%$ sein.

6.4 Für sehr stark verflüssigte Betone, wie z.B. für frühhochfeste Fließbetone im Straßenbau, ist ein ausreichender Gehalt an kleinen Poren selbst bei hohem Gesamtluftgehalt im Frischbeton kaum zu erzielen. Eine Verbesserung kann erreicht werden, wenn das angestrebte hohe Maß der Verflüssigung nicht allein durch die Fließmittelmenge, sondern durch Menge, Kornaufbau und Zusammensetzung der Feinstkornmatrix erzielt wird. Bei der Eignungsprüfung müssen in diesem Fall die Luftporenkennwerte am Frisch- oder Festbeton bestimmt werden.

6.2 Where a concrete has been plasticized with a plasticizer or superplasticizer, the air-void distribution is displaced towards larger voids, and this effect is greater the larger the plasticizing effect. In this case adequate resistance to freeze-thaw with de-icing salt is only provided if the total air content is increased by a correspondingly higher addition of the air-entraining agent.

6.3 The total air content in the unset concrete in soft, air-entrained, concretes and in concretes which contain plasticizers or superplasticizers, must be increased by 1% in relation to the values in DIN 1045. If the air-void parameters are determined during suitability testing then the spacing factor must be $\leq 0.20 \text{ mm}$ and the micro-air-void content $L 300 \geq 1.8 \%$.

6.4 For very heavily plasticized concretes, e.g. for high early strength, superplasticized, concretes used in road construction, it is hardly possible to achieve an adequate content of small voids, even with high air contents in the concrete. An improvement can be achieved if the desired high level of plasticizing is achieved not solely through the quantity of superplasticizer but also through the quantity, size structure and composition of the very fine particle matrix. In this case the air-void parameters must be measured in the unset or hardened concrete during suitability testing.

SCHRIFTTUM/LITERATURE

- [1] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 167, Berlin 1965, S. 3/57.
- [2] Bonzel, J., und E. Siebel: 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.
- [3] Sommer, H.: Ein neues Verfahren zur Erzielung der Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons. Zement und Beton 22 (1977) H. 4, S. 124/129.
- [4] Gast, R.: Luftporen im Beton – Veränderung durch Transport und Einbau. Beton 30 (1980) H. 10, S. 367/371, siehe auch Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMV, Abteilung Straßenbau, H. 312, S. 1/64, Bonn 1980.
- [5] Internationales Kolloquium „Frostbeständigkeit von Beton“, Wien, Juni 1980. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, H. 33, Wien 1980.
- [6] Superplasticizers in Concrete. Proceedings of an International Symposium, 29. bis 31. Mai 1978 in Ottawa, Kanada; herausgegeben von V.M. Malhotra, ACI-Publication CP-62, Detroit 1979.
- [7] Developments in the Use of Superplasticizers. Second International Conference on Superplasticizers in Concrete. Ottawa 1981; herausgegeben von V.M. Malhotra. American Concrete Institute. Publication SP-68, Detroit 1981.
- [8] Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Proceedings of an International Symposium 1989 in Ottawa, Kanada; herausgegeben von V.M. Malhotra. ACI Publication SP 119, Detroit 1989.
- [9] Siebel, E.: Air-Void Characteristics and Freezing and Thawing Resistance of Superplasticized Air-Entrained Concrete with High Workability. In [8], S. 297/319.
- [10] Litvan, G.G.: Air Entrainment in the Presence of Superplasticizers. ACI-Journal 80 (1983) Nr. 4, S. 326/331.
- [11] Nischer, P.: Einführung von künstlichen Luftporen in Fließbeton. Betonwerk und Fertigteil-Technik, 43 (1977) H. 6, S. 285/288.
- [12] Siebel, E.: Beeinflussung der Luftporenkennwerte bei leicht verarbeitbarem Beton mit Fließmittel für Verkehrsflächen. Beitrag zum Internationalen Betonstraßen-Symposium 1986 in Aachen.
- [13] Sommer, H., und N. Sinnhuber: Wie erreicht man ein befriedigendes Luftporensystem bei Straßenbeton mit Fließmittel. Straße und Autobahn 38 (1987) H. 2, S. 50/52.
- [14] Bonzel, J., und E. Siebel: Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton. Anleitung für die Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton – Mikroskopische Luftporenuntersuchung (Fassung 1981). Beton 31 (1981) H. 12, S. 459/466; ebenso Betontechnische Berichte 21 (1980/81), Beton-Verlag, Düsseldorf 1982, S. 169/188.
- [15] Siebel, E., und E. Eickschen: Bestimmung der Luftporenkennwerte am Frischbeton. Forschungsberichte. Bundesminister für Verkehr, H. 640, Bonn 1993.
- [16] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen Köln 1991.
- [17] Richtlinie für Beton mit Fließmittel und für Fließbeton – Herstellung, Verarbeitung und Prüfung – (Ausgabe Januar 1986). Deutscher Ausschuß für Stahlbeton Berlin 1986.
- [18] Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzungen zu DIN 1048. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 422, Beuth-Verlag, Berlin 1991.
- [19] Superplasticizing admixtures in concrete. Report of a Joint Working Party of the Cement Admixtures Association and the Cement and Concrete Association, Wexham Springs 1976.
- [20] Spanka, G., G. Thielen, und H. Grube: Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln. Beton 45 (1995) H. 11 und H. 12 (in Vorbereitung).
- [21] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren. Beton 42 (1992) H. 5, S. 496/501; ebenso Betontechnische Berichte 26 (1992-94). Beton-Verlag, Düsseldorf 1995, S. 33/51.
- [22] Rixom, M. R., und N. P. Mailvaganam: Chemical Admixtures for Concrete. E. + F. N. Spon, London 1986.
- [23] Manns, W., und B. Neubert: Frühhochfester Beton für Verkehrsflächen. Beton 45 (1995) H. 5, S. 312/316.
- [24] Baekmark, K., H. Hansen und J. Reichert: Stabilized Air Void System in Superplasticized Concrete. Concrete Technology – Past, Present and Future. American Concrete Institute SP-144, Detroit 1994.