

Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel

Adjusting the consistency of concrete using superplasticizers

Gerd Thielen, Gerhard Spanka, Horst Grube; Düsseldorf

Übersicht

Die Verarbeitbarkeit von Frischbeton, seine Konsistenz und sein Zusammenhaltevermögen werden beeinflusst durch den Kornaufbau des Fein- und Grobzuschlags sowie durch Menge und Fließfähigkeit der aus dem Zement und gegebenenfalls anderen mehlfinen Stoffen und dem Anmachwasser bestehenden Suspension, dem Leim. Die Fließfähigkeit des Leims kann durch verflüssigende Betonzusatzmittel gezielt verändert werden. In der vorliegenden Arbeit wird über das Zusammenwirken von Leim und Zuschlag hinsichtlich der daraus resultierenden Verarbeitungseigenschaften von Frischbeton berichtet. Die Untersuchungsergebnisse zeigen die Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz von Betonverflüssigern und Fließmitteln, um gut verarbeitbare bis fließfähige Betone mit hohem Zusammenhaltevermögen und geringer Wasserabsonderung herzustellen.

1 Grundlagen

Frischbeton ist ein Gemenge aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen, dessen rheologisches Verhalten durch das Zusammenwirken dieser drei Stoffphasen bestimmt wird. Bei Bewegung und Verformung des Frischbetons bewegt sich der Grobzuschlag in dem mehr oder weniger fließfähigen Leim, d.h. in einer Suspension aus Wasser, Zement, feinkörnigem Zuschlag und eingeschlossener Luft sowie gegebenenfalls Betonzusatzstoffen und Betonzusatzmitteln. Dieser Leim enthält alle die Bestandteile, von denen die wesentlichen Verarbeitungsmerkmale und letztlich die Festigkeitsbildung abhängen. Die Feststoffe des Leims umfassen alle feinkörnigen Bestandteile des Betons mit einer hohen volumenbezogenen Oberfläche. Für die Festlegung einer Grenze für die Partikelgröße, oberhalb der die Feststoffe nicht mehr zum Leim gezählt werden, gibt es keine eindeutigen Kriterien. Die zur Definition von Mehlkorn in DIN 1045 [1] festgelegte obere Prüfkorngröße von 125 µm hat sich in den vorliegenden Untersuchungen als sinnvolle Grenze der zum Leim bzw. zum Zuschlag zu zählenden Feststoffpartikel erwiesen.

Der heterogene Aufbau von Beton mit Partikelgrößen der Feststoffe vom Mikrometer- bis hin zum Zentimeterbereich erschwert eine umfassende Beschreibung der Verarbeitungseigenschaften mit rheologischen Meßverfahren. Dies hat dazu geführt, daß jeweils unterschiedliche Meßverfahren herangezogen werden, um unterschiedliche Verarbeitungsmerkmale wie Verdichtungsfähigkeit [2], Fließen [3-5], Konsistenz [6,7] oder Zusammenhaltevermögen bzw. Bluten [8,9] zu bestimmen. Diese Meßverfahren haben sich in der Praxis für Eignungs- und Güteprüfungen bewährt. Sie erfassen die stoffabhängigen Einflüsse auf die Verarbeitungsmerkmale summarisch und erlauben eine praxismgerechte Einstufung des Frischbetons. Ein voraussagbarer Zusammenhang zwischen der Viskosität und der Menge des Leims einerseits und der Konsistenz des Betons andererseits läßt sich damit jedoch nicht herstellen. Dazu sollen die hier dargestellten Untersuchungen beitragen, die sich im wesentlichen auf Viskositätsmessungen am Leim (Rotationsviskosimeter) und Konsistenzmessungen am Beton (Ausbreitmaß) stützen. In dieser Arbeit werden ausschließlich gefügedichte Betone in den Konsistenzbereichen KP bis KF untersucht. Die maßgeblichen Verarbeitungsmerkmale des Frischbetons sind dabei die Konsistenz und das Zusammenhaltevermögen.

Umfangreiche Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie haben bisher den rheologischen Eigenschaften des Leims in Abhängigkeit von dessen stofflicher Zusammensetzung [10] gegolten. Wichtigste Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im nächsten Abschnitt nochmals kurz zusammengefaßt. Der Schwerpunkt

Abstract

The workability of fresh concrete, its consistency, and its cohesive ability are influenced by the granulometric composition of the fine and coarse aggregates and by the quantity and flowability of the paste consisting of the cement and possibly of other constituents and the mixing water. The flowability of the paste can be modified in a controlled manner by adding plasticizing concrete admixtures. This paper reports the interaction of paste and aggregate, and the resulting workability characteristics of fresh concretes. The research results show the possibilities and limitations of using concrete plasticizers and superplasticizers in the production of easily workable concretes of high cohesive ability and low water segregation.

1 Fundamental principles

Fresh concrete is a mixture of solid, liquid and gaseous constituents and its rheological behaviour is determined by the interaction of these three material phases. During the movement and deformation of fresh concrete the coarse aggregate moves within the more or less flowable paste, i.e. in a suspension of water, cement, fine-grained aggregate and included air, and possibly also concrete additions and admixtures. This paste contains all the constituents on which the important workability characteristics, and ultimately also the strength formation, depend. The solids in the paste include all the fine-grained constituents of the concrete with high volume-specific surface areas. There are no clear criteria for defining a limit for the particle size above which the solids no longer count as part of the paste. In these investigations the upper particle size of 125 µm given in DIN 1045 [1] for defining flour-fines has proved to be a suitable limit for solids particles to be counted either as paste or as aggregate.

The heterogeneous composition of concrete with particle sizes of the solids ranging from the micrometer to the centimetre range makes it difficult to provide a comprehensive description of the workability characteristics with rheological test methods. This has meant that different test methods are used in each case for determining the different workability characteristics such as compactability [2], flow [3 - 5], consistency [6, 7] or cohesive ability and bleeding [8, 9]. These test methods have proved effective in practice for suitability- and quality-tests. They summarize the material-dependent factors affecting the workability characteristics and permit practical classification of the fresh concrete. However, it has not been possible to establish a predictable relationship between the viscosity and quantity of the paste on the one hand and the consistency of the concrete on the other. The investigations described here, which are based essentially on viscosity measurements on the paste (rotational viscosimeter) and consistency measurements on the concrete (flow table spread), are intended to help solve this problem. Only dense-structured concretes in the consistency ranges KP to KF are investigated in this work, and the crucial workability characteristics of the fresh concrete are the consistency and the cohesive ability.

Extensive investigations carried out in the past at the Research Institute of the Cement Industry have considered the rheological properties of the paste as a function of its material composition [10]. The most important results of these investigations will be briefly summarized again in the following section. The emphasis of this work is on demonstrating the interaction of paste and aggregate and on working out design criteria for directed control of the workability characteristics of fresh concrete.

dieser Arbeit liegt in der Darstellung des Zusammenwirkens von Leim und Zuschlag und in der Erarbeitung von Entwurfskriterien zur gezielten Beeinflussung der Verarbeitungsmerkmale von Frischbeton.

2 Rheologisches Verhalten von Zementleimen und Mehlkorn-suspensionen

Zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von Feinstoff-suspensionen wurden umfangreiche Untersuchungen über die Auswirkungen verflüssigender Zusatzmittel auf die Viskosität von reinem Zementleim und von Mehlkornsuspensionen durchgeführt, über die in [10] berichtet wurde. Variiert wurden bei diesen Versuchen zum einen die Feststoffzusammensetzung der Feinstoffsuspensionen wie Zementart und -menge, Art und Menge der sonstigen mehlfeinen Stoffe und zum anderen die Zusammensetzung der flüssigen Phase, d.h. die Anmachwassermenge und die Art und Menge verflüssigender Betonzusatzmittel. Als mehlfeine Stoffe wurden neben dem Zement, Steinkohlenflugasche sowie Quarz- und Kalksteinmehle eingesetzt.

Zur näherungsweisen Beschreibung des rheologischen Verhaltens von Zementleimen und Mehlkornsuspensionen wurden zwei Hauptparameter, die Fließgrenze und die dynamische Viskosität, herangezogen. Zementleime können Scherkräfte unterhalb einer Mindestscherkraft – die Mindestscherkraft kennzeichnet die Fließgrenze – elastisch aufnehmen und beginnen erst zu fließen, wenn die Mindestscherkraft überschritten wird [11-15].

Für die in dieser Veröffentlichung dargestellten Untersuchungen wurden rheologische Messungen ausschließlich an Zementleimen mit einem Zement CEM I der Festigkeitsklasse 32,5 R durchgeführt. Diese Vereinfachung ist möglich, weil die umfangreichen Untersuchungen an beliebig zusammengesetzten Feinstoffsuspensionen gezeigt haben, daß Unterschiede in Art, Menge und Zusammensetzung des Mehlkorns sich bei gleicher Leimmenge und gleichem Scherwiderstand des Leims in praxisgerecht zusammengesetzten Betonen während üblicher Verarbeitungszeiten nicht mehr signifikant auf die Frischbetoneigenschaften auswirken. Die rheologischen Messungen wurden wiederum mit dem Rotationsviskosimeter „Viscomat PC“ durchgeführt. Um die beiden rheologischen Hauptparameter in den Messungen erfassen zu können, wurde ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Dieses betrug jeweils für einen Zeitraum von 10 Minuten im Belastungsbereich 90, 120, 150 und im Entlastungsbereich 120 und 90 Umdrehungen je Minute. In Tafel 1 ist die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Zements und in Tafel 2 sind die Ergebnisse der Normprüfungen nach DIN 1164 dargestellt. Als verflüssigendes Zusatzmittel wurde ein handelsübliches Fließmittel auf der Basis von Melaminsulfonat mit einem Feststoffgehalt von rd. 20 % verwendet. Die Angabe für die Zugabemenge in Prozent bezieht sich bei allen Versuchen immer auf die wässrige Lösung des Fließmittels, bezogen auf das Zementgewicht. Dabei wurde die gesamte Fließmittelmenge auf das Zugabewasser (Leitungswasser) angerechnet.

Da bei einer Zugabe verflüssigender Betonzusatzmittel einige Minuten nach der Zugabe des Wassers eine deutlich größere verflüssi-

Tafel 1 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung des Zements CEM I 32,5 R in Gew.-%

Table 1 Chemical and mineralogical composition of the cement CEM I 32,5 R in weight-%

Glühverlust Loss on ignition	2,59
CaO	64,4
SiO ₂	21,2
Al ₂ O ₃	5,9
Fe ₂ O ₃	2,5
K ₂ O	1,0
Na ₂ O	0,2
C ₃ S	48,5
C ₂ S	24,2
C ₃ A	11,4
C ₄ AF	7,8

2 Rheological behaviour of cement paste and flour-fine suspensions

Comprehensive investigations into the effects of plasticizing admixtures on the viscosity of pure cement paste and of flour-fine suspensions have been reported in [10], and were carried out to describe the rheological properties of flour-fine suspensions. Not only the solids compositions of the suspensions, such as the cement type and quantity, and the type and quantity of the other flour-fine substances, but also the composition of the liquid phase, i.e. the quantity of mixing water, and the type and quantity of the plasticizing concrete admixtures, were varied during these trials. Beside cement, the flour-fine materials as coal fly ash, quartz- and limestone- flour were used.

Two principle parameters, the yield value and the dynamic viscosity, were used for approximate description of the rheological behaviour of cement pastes and flour-fine suspensions. Cement pastes can absorb shear forces elastically below a minimum shear force – the minimum shear force characterizes the yield value – and only start to flow when the minimum shear force is exceeded [11 – 15].

For the investigations described in this publication the rheological measurements were all carried out on cement pastes with a CEM I cement of the 32,5 R strength class. This simplification is possible because comprehensive investigations on fine suspensions with all sorts of compositions have shown that, for the same quantity of paste and the same shear resistance of the paste in concretes with normal compositions, any differences in type, quantity and composition of the flour-fine have no significant effect on the properties of the fresh concrete during normal workability times. The rheological measurements were carried out with the „Viscomat PC“ rotational viscosimeter. A speed profile was specified so that the two principal rheological parameters could be covered in the measurements. This was made up of periods of 10 minutes each at 90, 120 and 150 rpm in the load range and 120 and 90 rpm in the load-relief range. Table 1 shows the chemical and mineralogical compositions of the cement and Table 2 shows the results of the standard tests as specified in DIN 1164. The plasticizing admixture used was a normal commercial superplasticizer based on melamine sulfonate with a solids content of about 20%. In all the trials the data on the percentage quantity added relates to the aqueous solution of the superplasticizer relative to the cement weight. The total quantity of superplasticizer was counted as mixing water (mains water).

Tafel 2 Physikalische Eigenschaften sowie Erstarren und Normfestigkeit des Zements CEM I 32,5 R, geprüft nach DIN EN 196

Table 2 Physical properties as well as setting and standard strength of the cement CEM I 32,5 R tested according to DIN EN 196

Rohdichte Density	kg/dm ³		3,12
Spez. Oberfläche Spec. Surface	cm ² /g		2 950
Wasseranspruch Water demand	%		23,5
Erstarren Setting	Beginn Start	h	3,1
	Ende End	h	4,0
Zementnormfestigkeit Cement strength	2 d	N/mm ²	22,7
	7 d		37,2
	28 d		47,6

If the plasticizing concrete admixture is added a few minutes after the addition of the water it has a significantly greater plasticizing effect than if it is added at the same time as the mixing water [16, 17] so in all the investigations the superplasticizer was added four minutes after the start of mixing. The cement paste was mixed in a Hobarth mixer. After a total mixing time of five minutes the paste was transferred to the Viscomat measuring vessel. The Viscomat test was then started six minutes after the start of mixing; a constant paste

gende Wirkung auftritt als bei einer Zugabe gleichzeitig mit dem Zugabewasser [16,17], wurde das Fließmittel bei allen Untersuchungen vier Minuten nach Mischbeginn zugegeben. Die Zementleime wurden in einem Hobarth-Mischer gemischt. Nach einer Gesamtdauer von fünf Minuten wurden die Leime in den Viskomatmeßtopf eingefüllt. Sechs Minuten nach dem Mischbeginn wurde mit dem Viskomatversuch begonnen, dabei wurde über den thermostatisierbaren Meßtopf während der Versuche eine konstante Leimtemperatur von 20°C eingestellt.

Im Bild 1 sind experimentell ermittelte Scherwiderstände für Zementleime mit unterschiedlichen Wasserzementwerten von 0,40 bis 0,70 über der Fließmittelmenge aufgetragen. Aus dem Bild geht hervor, daß sich die Scherwiderstände der Leime mit steigender Fließmittelmenge zunächst kontinuierlich verringern, z.B. für den Leim mit dem Wasserzementwert 0,40 bis zu einer Zugabemenge von etwa 1,1%. Eine darüber hinausgehende Steigerung der Zugabemenge hat keine weitere Erniedrigung des Scherwiderstandes mehr zur Folge.

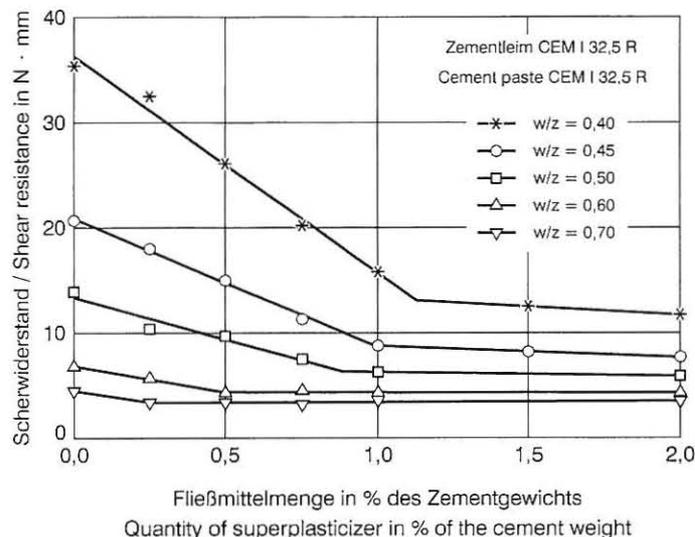


Bild 1 Einfluß eines Fließmittels auf den Scherwiderstand von Zementleimen CEM I 32,5 R mit Wasserzementwerten von 0,40 bis 0,70

Fig 1 Influence of a superplasticizer on the shear resistance of cement pastes CEM I 32,5 R with water/cement ratios of 0,40 to 0,70

In [10] ist gezeigt worden, daß dieser Knickpunkt durch eine weitgehende Dispergierung aller Feststoffpartikel gekennzeichnet ist, und daß sich diese in der Literatur [18] als Sättigungspunkt bezeichnete Grenze durch die Zugabe weiterer mehlfeyner Stoffe zu größeren Zusatzmittelmengen hin verschieben läßt (siehe Bild 2). Da bei höheren Wasserzementwerten die Scherwiderstände bereits ohne Zusatzmittel sehr niedrig sind (Bild 1), bewirkt die Zugabe des Fließmittels bei solchen Zementleimen nur eine geringe Änderung des Fließverhaltens. Dabei wird der Sättigungspunkt mit zunehmendem Wasserzementwert bei immer geringeren Zusatzmittelmengen erreicht.

Die Verringerung des Scherwiderstands bis zu einem unteren Grenzwert läßt sich damit erklären, daß durch die fließmittelbedingte Dispergierung der Feinstoffpartikel die Fließgrenze des Leims verringert wird und am Sättigungspunkt auf einen Wert um Null abgesunken ist. Oberhalb des Sättigungspunkts wird der Scherwiderstand nur noch durch die dynamische Viskosität des Leims verursacht und hängt im wesentlichen vom Feststoffgehalt der Suspension, d.h. bei Zementleimen vom Wasserzementwert ab, und kann durch eine Fließmittelzugabe nicht mehr signifikant beeinflusst werden [10].

Im Bild 3 sind die experimentell ermittelten Scherwiderstände der Zementleime über dem Wasserzementwert der Leime aufgetragen. Anhand dieser Art der Darstellung werden die praxisrelevanten Wirkungsbereiche der Fließmittel deutlich. Die durch Fließmittel verursachte Verringerung der Scherwiderstände des Leims infolge Di-

temperature of 20°C was maintained during the test by the constant temperature control on the measuring vessel.

Experimentally measured shear resistances for cement pastes with water/cement ratios varying from 0.40 to 0.70 are plotted in Fig. 1 against the quantity of superplasticizer. It can be seen from the diagram that at first the shear resistance of the paste decreases continuously with increasing quantity of superplasticizer, e.g. up to an addition of about 1.1% for the paste with a water/cement ratio of 0.40. Any further increase in the amount added does not produce any additional reduction in the shear resistance.

It has been shown in [10] that this break-point is characterized by substantial dispersion of all the solids particles and that this limit, designated in the literature [18] as the saturation point, can be displaced towards greater quantities of the admixture by the addition of further flour-fine materials (see Fig. 2). With fairly high water/cement ratios the shear resistances are already very low without any admixture (Fig. 1) so the addition of superplasticizer to such cement pastes produces only a slight change in the flow behaviour. With increasing water/cement ratio the saturation point is reached with ever lower quantities of admixture.

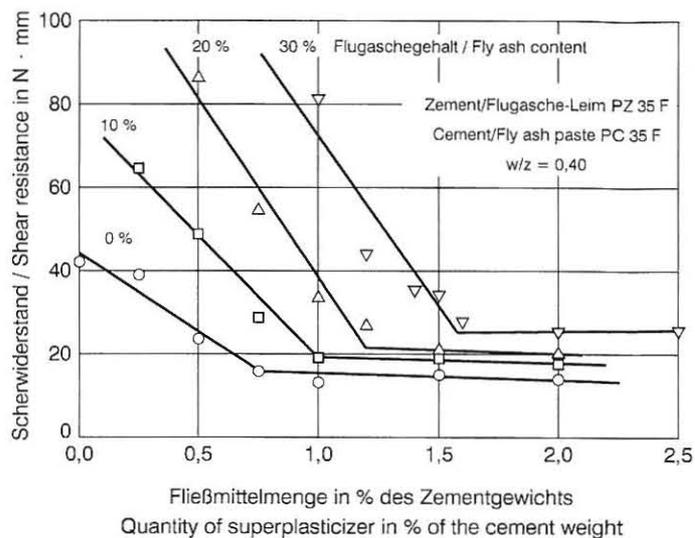


Bild 2 Einfluß eines Fließmittels (Zusatzmittelgrundstoff) auf den Scherwiderstand von Zement/Flugasche-Leimen PZ 35 F mit Wasserzementwerten von 0,40 und mit 0 bis 2,5 Gew.-% Fließmittel, bezogen auf den Zement [10]

Fig 2 Influence of a superplasticizer (Basic admixture) on the shear resistance of cement/fly-ash pastes PZ 35 F with water/cement ratios of 0,40 and with 0 to 2,5 wt. % superplasticizer relative to the cement [10]

The reduction of the shear resistance down to a lower limit can be explained by the fact that the dispersion of the fines particles by the superplasticizer lowers the yield value of the paste which is reduced to a value close to zero at the saturation point. Above the saturation point the shear resistance is caused only by the dynamic viscosity of the paste and depends essentially on the solids content of the suspension, i.e. with cement pastes it depends on the water/cement ratio, and can no longer be influenced significantly by the addition of a superplasticizer [10].

The experimentally determined shear resistances of the cement pastes have been plotted in Fig. 3 against the water/cement ratios of the pastes. This method of representation gives a clear illustration of the practical effective range of the superplasticizer. The reduction in the shear resistance of the paste caused by the superplasticizer as a result of dispersing the fines produces a significant plasticizing effect in high-solids, low-water pastes. In high-water pastes the fines dispersion by the superplasticizer only makes a secondary contribution to the plasticizing effect as the shear resistances are already low without any superplasticizer. The dispersion of the fines in high-water pastes also promotes sedimentation and segregation, and is

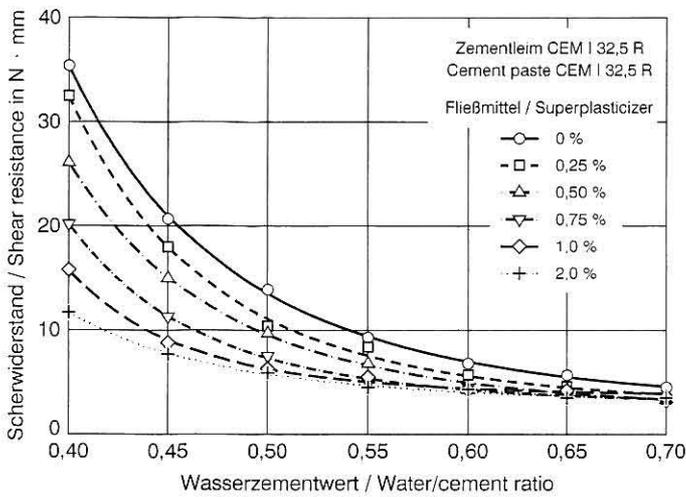


Bild 3 Einfluß des Wasserzementwerts auf den Scherwiderstand von Zementleim CEM I 32,5 R mit 0 bis 2,0 Gew. % Fließmittel

Fig 3 Influence of the water/cement ratio on the shear resistance of cement pastes CEM I 32,5 R with 0 to 2,0 wt. % superplasticizer relative to the cement

spargierung der Feinstoffe hat bei feststoffreichen, wasserarmen Leimen eine signifikante Verflüssigung zur Folge. Bei wasserreichen Leimen trägt die Feinstoffdispargierung durch Fließmittel nur noch in untergeordnetem Maß zur Verflüssigung bei, da diese auch ohne Fließmittel bereits geringe Scherwiderstände aufweisen. Zusätzlich begünstigt die Dispergierung von Feinstoffen in wasserreichen Leimen die Sedimentation sowie Entmischung und verschlechtert damit das Zusammenhaltevermögen bzw. erhöht die Tendenz zur Wasserabsonderung.

3 Betonuntersuchungen

3.1 Untersuchte Stoffe

Der Leimgehalt in l/m^3 sowie die rheologischen Eigenschaften des Leims sind die Parameter für den Mischungsentwurf, mit denen die Verarbeitungsmerkmale eines Frischbetons mit gegebener Sieblinie und Kornform des Zuschlags gezielt beeinflusst werden können. In den folgenden Untersuchungen werden die Einflüsse verschiedener Kornzusammensetzungen und Kornformen des Zuschlags nicht näher verfolgt, sondern es werden nur die aus der Matrix resultierenden Einflüsse bei gleichen Zuschlagmerkmalen untersucht. Für die Versuche wurden der gleiche Zement CEM I 32,5 R und das gleiche Fließmittel verwendet, die auch bei den im vorigen Abschnitt beschriebenen Zementleimversuchen eingesetzt wurden. Als Zuschlag wurde mehlkornarmer Rheinkies sand der Sieblinie AB 16 entsprechend der in Bild 4 dargestellten Sieblinie verwendet. Der berechnete volumenbezogene Hohlraumgehalt des aus diesem Zuschlag aufgebauten Korngerüsts beträgt bei dichtester Lagerung ca. 22 Vol. % [19].

3.2 Betonherstellung und Prüfung

Die Betone wurden in einem Freifallmischer hergestellt. In Tafel 3 sind die Zusammensetzungen der Ausgangsbetone zusammengefaßt. Die Frischbetonkonsistenz der Ausgangsbetone nach 45 Minuten wurde anhand des Ausbreitversuchs (a_{45}) gemäß DIN 1048 [6] ermittelt. Nach der Bestimmung des Ausbreitmaßes a_{45} wurde den jeweiligen Ausgangsbetonen das Fließmittel in Schritten von 0,2 bis 0,4 %, bezogen auf das Zementgewicht, zugegeben. Nach jeder Zugabe des Fließmittels wurde der Frischbeton für jeweils 30 Sekunden erneut gemischt und das resultierende Ausbreitmaß a_{45} erneut ermittelt.

3.3 Ergebnisse der Betonversuche

3.3.1 Einfluß der Leimmenge auf das Ausbreitmaß des Frischbetons

Bild 5 zeigt den Einfluß der Leimmenge auf das Ausbreitmaß nach 45 Minuten (a_{45}), und zwar für Leime, deren unterschiedliche Scher-

therefore detrimental to the cohesive ability and increases the tendency to bleed.

3 Concrete investigations

3.1 Test material

The paste content in l/m^3 and the rheological properties of the paste are the parameters for the mix design with which the workability properties of a fresh concrete of given grading curve and particle shape of the aggregate can be controlled selectively. The effects of different granular compositions and particle shapes of the aggregate are not examined in any greater detail in the following investigations, and the only effects investigated are those caused by the matrix for the same aggregate properties. The same CEM I 32,5 R cement and the same superplasticizer were used for the trials as for the cement paste trials described in the previous section. Low-fines Rhine sand and gravel with an AB 16 grading curve, corresponding to the grading curve shown in Fig. 4, were used as aggregate. The calculated volume-specific void content of the granular skeleton made up from this aggregate came to about 22 vol.% for the densest packing [19].

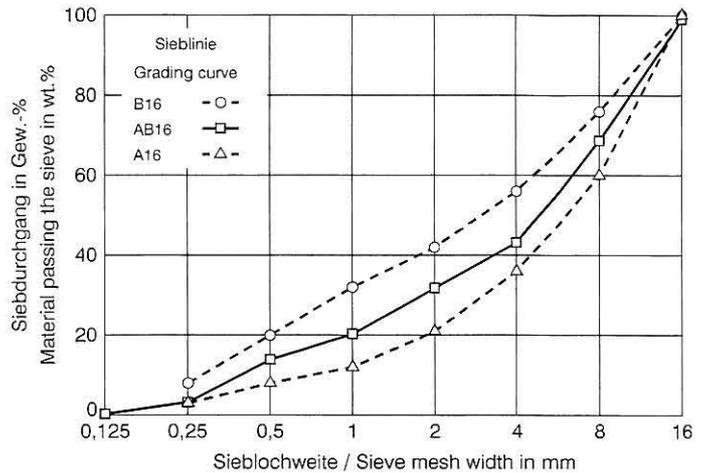


Bild 4 Sieblinien A 16 und B 16 nach DIN 1045 sowie die Sieblinie des verwendeten mehlkornarmen Rheinkiesandes

Fig 4 Grading curves A 16 and B 16 according to DIN 1045 and the grading curve of the used Rhine sand and gravel, low in fines

Tafel 3 Zusammensetzung der Ausgangsbetone

Table 3 Composition of the starting concretes

Wasserzementwert Water/cement ratio	Zementleimgehalt Content of cement paste l/m^3	Zugabewasser Mixing water l/m^3	Zement Cement kg/m^3	Zuschlag Aggregate kg/m^3
0,40	200	111	277	2054
	250	138	346	1924
	300	166	415	1794
	350	194	484	1664
0,50	200	122	243	2054
	250	152	304	1924
	300	182	365	1794
	350	213	425	1664
0,60	200	130	217	2054
	250	163	271	1924
	300	195	325	1794
	350	228	379	1664
0,70	200	137	196	2054
	250	171	244	1924
	300	205	293	1794
	350	240	342	1664

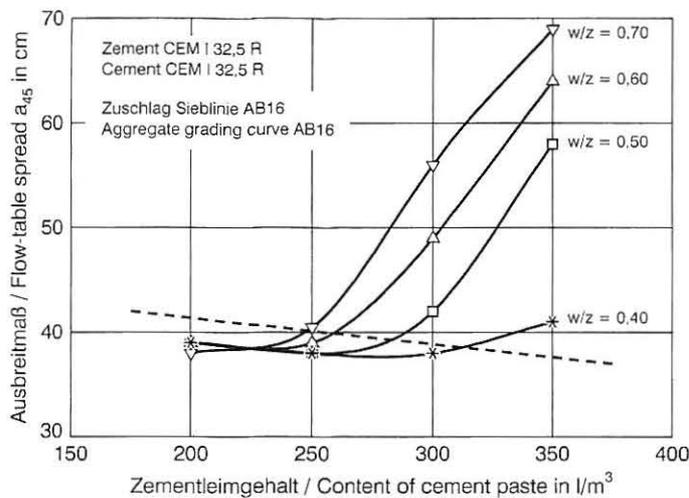


Bild 5 Einfluß der Zementleimgehalts und des Wasserzementwerts auf das Ausbreitmaß nach 45 Minuten (a_{45}) von Beton mit Zement CEM I 32,5 R, Zuschlag der Sieblinie AB 16

Fig 5 Influence of the content of cement paste and of the water/cement ratio on the flow-table spread after 45 minutes (a_{45}) of concretes with cement CEM I 32,5 R, aggregate with the grading curve AB 16

widerstände auf unterschiedliche Wasserzementwerte (ohne Zugabe von Fließmitteln) zurückzuführen sind. Die zugehörigen Scherwiderstände der Zementleime können Bild 1 entnommen werden.

Bild 5 bestätigt die in der Praxis gewonnene Erfahrung, daß sich eine Veränderung des Scherwiderstands des Leims bzw. seiner Fließfähigkeit nur dann auf das Ausbreitmaß auswirkt, wenn die Leimmenge ausreicht, um Hohlräume des Zuschlaggerüsts so zu füllen, daß eine leichte Verschiebung der Zuschläge ermöglicht wird. Der entsprechende Mindestwert für den Leimgehalt ergab sich für die hier untersuchten Betone zu etwa 250 l/m^3 bei einem Mindesthohlraumgehalt des Zuschlags von ca. 22 Vol.%. Neben der Bedingung eines ausreichenden Mindestleimgehalts bestimmt das Zusammenhaltevermögen die Eignung der Frischbetonmischung für die unterschiedlichen Betonieraufgaben. Unterhalb der in Bild 5 gestrichelt dargestellten Linie lagen die Betonzusammensetzungen, die beim Ausbreitversuch zerfielen und kein ausreichendes Zusammenhaltevermögen zeigten.

Oberhalb einer Mindestleimmenge von etwa 250 l/m^3 kann durch eine Herabsetzung des Scherwiderstands des Leims, d.h. durch eine Verbesserung seiner Fließfähigkeit, das Ausbreitmaß bei gleicher Leimmenge signifikant erhöht werden. Einer Erhöhung der Fließfähigkeit durch Wasserzugabe, d.h. einer Erhöhung des Wasserzementwerts, ist durch die dabei bedingten Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaft eine Grenze gesetzt. Deshalb kommt der Erniedrigung des Scherwiderstands durch Fließmittelzugabe zur Herstellung leicht verarbeitbarer Betone die größere praktische Bedeutung zu. Dies gilt besonders für Betone mit besonderen Eigenschaften bzw. für hochfeste und hochleistungsfähige Betone, d.h. für Betone mit niedrigem Anmachwassergehalt und dadurch bedingter geringer Kapillarporosität des erhärteten Zementsteins.

Die in Bild 6 dargestellten Pfeile geben die Erhöhung des Ausbreitmaßes an, die mit Leimen mit einem konstanten Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ durch Zugabe von Fließmittel im Vergleich zu entsprechenden Erhöhungen des Wasserzementwerts erzielt werden kann. Im praxisrelevanten Bereich von Betonen mit einer Leimmenge von über 250 l/m^3 erfordern diese Verbesserungen des Ausbreitmaßes a_{45} für die hier untersuchten Betone Fließmittelmengen von weniger als 10 l/m^3 .

3.3.2 Einfluß des Scherwiderstands des Leims auf Ausbreitmaß und Zusammenhaltevermögen des Frischbetons

Wie Bild 1 zeigt, wird durch die Erhöhung des Wasserzementwerts der Scherwiderstand des Zementleims signifikant erniedrigt; nämlich von etwa $35 \text{ N} \cdot \text{mm}$ bei $w/z = 0,40$ auf etwa $5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ bei $w/z = 0,70$. Die in Bild 5 gezeigte Steigerung des Ausbreitmaßes a_{45} wird, wie dargestellt, zum einen durch die Erhöhung der Leimmenge und zum

3.2 Concrete production and testing

The concretes were produced in a rotary drum mixer. The compositions of the starting concretes are listed in Table 3. The fresh concrete consistency of the starting concretes after 45 minutes were determined by the flow-table test (a_{45}) as specified in DIN 1048 [6]. After the a_{45} flow-table spread had been determined the superplasticizer was added to the respective starting concretes in steps of 0.2 to 0.4% relative to the cement weight. After each addition of the superplasticizer the fresh concrete was remixed for 30 seconds and the resulting a_{45} flow-table spread was determined again.

3.3 Results of the concrete tests

3.3.1 Effect of the quantity of paste on the flow-table spread of the fresh concrete

Fig. 5 shows the effect of the quantity of paste on the flow-table spread after 45 minutes (a_{45}) for pastes where the different shear resistances can be attributed to different water/cement ratios (without the addition of superplasticizer). The associated shear resistances of the cement pastes can be read from Fig. 1.

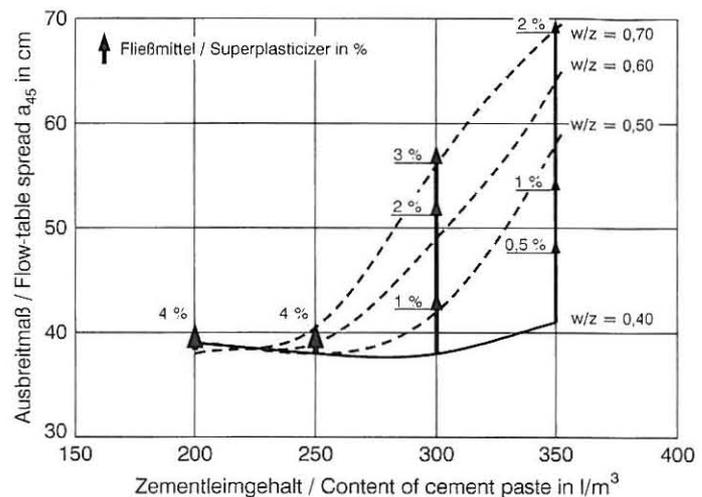


Bild 6 Einfluß eines Fließmittels auf das Ausbreitmaß nach 45 Minuten (a_{45}) von Betonen mit einem Wasserzementwert von 0,40 und Zementleimgehalten von 200 l/m^3 – 350 l/m^3 ; Zement CEM I 32,5 R, Zuschlag der Sieblinie AB 16

Fig 6 Influence of a superplasticizer on the flow-table spread after 45 minutes (a_{45}) of concretes with a water/cement ratio of 0,40 and a content of cement paste of 200 l/m^3 – 350 l/m^3 , cement CEM I 32,5 R, aggregate with the grading curve AB 16

Fig. 5 confirms the practical experience that a change in the shear resistance of the paste or in its flowability only affects the flow-table spread if the quantity of paste is sufficient to fill the voids in the aggregate skeleton to such an extent that it allows the aggregate to move easily. The corresponding minimum value for the paste content for the concretes investigated here came to about 250 l/m^3 for a minimum voids content of the aggregate of about 22 vol.%. In addition to the condition for an adequate minimum paste content the cohesive ability determines the suitability of the fresh concrete mix for different concreting tasks. The concrete compositions below the broken line in Fig. 5 were those which collapsed during the flow-table test and did not exhibit sufficient cohesive ability.

Above a minimum paste content of about 250 l/m^3 the flow-table spread can be significantly increased for the same quantity of paste by reducing the shear resistance of the paste, i.e. by improving its flowability. There are limits to raising the flowability by adding water, i.e. by increasing the water/cement ratio, because of the resulting effects on the properties of the hardened concrete. This is the reason for the great practical importance of lowering the shear resistance by adding superplasticizers to produce easily workable concretes. This is particularly true for concretes with special properties respectively for high-strength and high-performance concretes with low mixing

anderen durch eine Verringerung des Scherwiderstands des Leims infolge Erhöhung des Wasserzementwerts verursacht. Es besteht somit ein enger Zusammenhang zwischen der Konsistenzsteigernden Wirkung durch eine Erhöhung des Leimgehalts und der Verringerung des Scherwiderstands durch Erhöhung des Wasserzementwerts. Für die hier untersuchten Betone ist dieser Zusammenhang in Bild 7 skizziert.

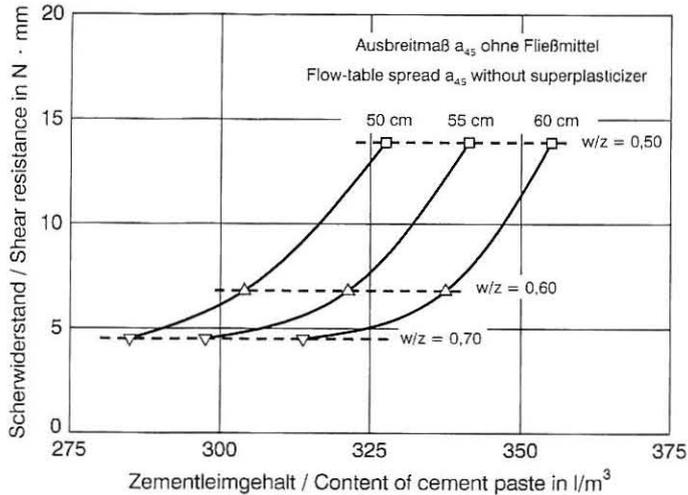


Bild 7 Zusammenhang zwischen Zementleimgehalt und Scherwiderstand des Zementleims zur Erzielung vorgegebener Ausbreitmaße nach 45 Minuten (a_{45}); Zement CEM I 32,5 R, Zuschlag der Sieblinie AB 16

Fig 7 Relation between the content of cement paste and the shear resistance of the cement paste for given flow table spreads after 45 minutes (a_{45}); cement CEM I 32,5 R, aggregate with grading curve AB 16

Die bei der Erhöhung des Wasserzementwerts gültigen Zusammenhänge gelten auch bei der Zugabe von Fließmitteln. Die zur Dispergierung der Feinstoffpartikel im Leim notwendige Fließmittelmenge kann durch Eignungsversuche im Viscomat, wie in Abschnitt 2 beschrieben, ermittelt werden. Die im Beton notwendige Dosierung kann jedoch höher liegen, wie Bild 8 zeigt. Durch den Fein- und Grobzuschlag werden Fließmittelmengen sorbiert, die zur vollständigen Dispergierung des Mehlkorns im Leim nicht mehr zur Verfügung stehen. Zur Erzielung einer maximalen Verflüssigung muß, bezogen auf den Sättigungspunkt des Zementleims, in der Regel eine Überdosierung an Fließmittel im Beton vorgenommen werden, um die zur Dispergierung der Feinstoffe erforderliche wirksame Fließmittelmenge zu erreichen.

Eine weitere Steigerung der Konsistenz kann unter dieser Bedingung nur noch durch eine Erhöhung des Leimvolumens erzielt werden (Bild 6).

Vergleicht man die konsistenzsteigernde Wirkung einer Erhöhung des Wasserzementwerts mit der einer Fließmittelzugabe, so wird deutlich, daß fließmittelhaltige Leime mit höheren Scherwiderständen in der Regel eine größere Konsistenzsteigerung zur Folge haben als Leime mit wasserzementwertbedingten niedrigeren Scherwiderständen.

Bei Fließmittelzugabe wird die größte Konsistenzsteigerung also dann erreicht, wenn die Feinstoffe des Leims weitestgehend dispergiert sind. Entscheidend ist die Tatsache, daß bei Betonen mit feinstoffreichen Leimen das Ausbreitmaß durch Fließmitteldosierung und durch Veränderung des Leimgehalts wirkungsvoll beeinflusst werden kann.

Neben der Konsistenz ist das Zusammenhaltevermögen des Frischbetons von entscheidender Bedeutung für Verarbeitung und Verdichtung. Die Tragfähigkeit des Leims und damit das Zusammenhaltevermögen des Betons können dadurch erhöht werden, daß der Feststoffanteil im Leim durch weitere mehlfine Stoffe, wie z.B. Kalksteinmehl, Flugasche oder Silicastaub, erhöht wird (Bild 2). Wie zuvor erläutert, erlauben derartig feinstoffreiche Leime bei entsprechender Fließmittelzugabe eine praxisgerechte Erhöhung des Aus-

water contents and the resulting low capillary porosities of the hardened cement paste.

The arrows shown in Fig. 6 indicate the increase in flow-table spread which can be achieved with pastes with a constant water/cement ratio of $w/c = 0.40$ by adding superplasticizer in comparison with corresponding increases in water/cement ratio. In the range of concretes used in practice containing paste in quantities of over 250 l/m^3 these improvements in the a_{45} flow-table spread only require quantities of superplasticizers of less than 10 l/m^3 for the concretes investigated here.

3.3.2 Effect of the shear resistance of the paste on the flow-table spread and cohesive ability of the fresh concrete

As is shown by Fig. 1, the shear resistance of the cement paste is reduced significantly by raising the water/cement ratio; namely from about $35 \text{ N} \cdot \text{mm}$ at $w/c = 0.40$ to about $5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ at $w/c = 0.70$. The rise in a_{45} flow-table spread shown in Fig. 5 is caused, as described, partly by increasing the quantity of paste and partly by reducing the shear resistance of the paste by increasing the water/cement ratio. There is therefore a close relationship between the consistency-raising effect by increasing the paste content and the reduction in shear resistance by raising the water/cement ratio. This relationship is traced in Fig. 7 for the concretes investigated here.

The relationships which apply when the water/cement ratio is increased also apply to the addition of superplasticizers. The quantity of superplasticizer needed to disperse the fines particles in the paste can be determined by suitability trials in the Viscomat, as described in Section 2. The level of addition required in the concrete may however be higher, as is shown by Fig. 8. Quantities of superplasticizer are absorbed by the fine and coarse aggregate and are then no longer available for complete dispersion of the ultrafines in the paste. To achieve the maximum plasticizing effect it is in general necessary to add excess superplasticizer to the concrete, relative to the saturation point of the cement paste, in order to achieve the quantity of effective superplasticizer needed to disperse the fines.

Under these conditions any further increase in consistency can only be achieved by raising the volume of the paste (Fig. 6).

When the consistency-increasing effect of raising the water/cement ratio is compared with that of adding superplasticizer then it is clear that pastes with quite high shear resistances which contain super-

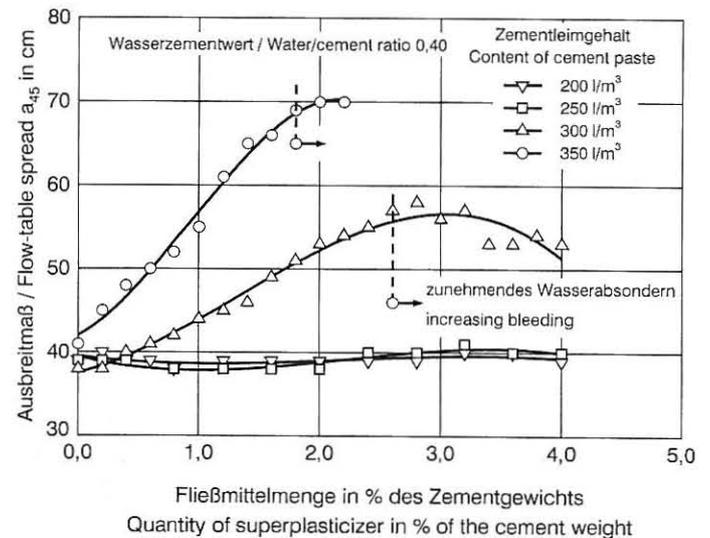


Bild 8 Einfluß der Fließmittelmenge auf das Ausbreitmaß nach 45 Minuten (a_{45}) für Betone mit Zementleimgehalten von 200 l/m^3 – 350 l/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,40; Zement CEM I 32,5 R, Zuschlag der Sieblinie AB 16

Fig 8 Influence of the quantity of superplasticizer on the flow table spread after 45 minutes (a_{45}) for concretes with a content of cement paste of 200 l/m^3 – 350 l/m^3 and a water/cement ratio of 0,40, cement CEM I 32,5 R, aggregate with grading curve AB 16

breitmaßes. Eine Steigerung der Konsistenz von Betonen, die zementleimarm sind oder durch zu hohe Anmachwassergehalte nicht genügend tragfähige Zementleime aufweisen, ist also dadurch möglich, daß der Gesamtleimgehalt bei konstantem Zement- und Wassergehalt durch weitere mehlfine Stoffe erhöht und dieser Leim durch ein Zusatzmittel verflüssigt wird. Damit gelingt für Beton die vollständige Entkoppelung von Verarbeitungsmerkmalen wie Ausbreitmaß und Zusammenhaltevermögen einerseits und Festbetoneigenschaften andererseits.

Zur Zeit wird ermittelt, wie sich die beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Fließfähigkeit des Leims und den Ausbreitmaßen von Betonen derart quantifizieren lassen, daß sie für eine rechnerunterstützte Betonherstellung genutzt werden können.

4 Zusammenfassung

4.1 Die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons, d.h. seine Konsistenz und sein Zusammenhaltevermögen, werden durch den Leimgehalt, die rheologischen Eigenschaften des Leims sowie durch Sieblinie und Kornform des Zuschlags bestimmt.

4.2 Die Konsistenz des Frischbetons kann sowohl durch Erhöhung des Leimgehalts als auch durch eine Verringerung des Scherwiderstands des Leims erhöht werden.

4.3 Der Scherwiderstand des Leims kann durch Wasserzugabe (Erhöhung des Wasserzementwerts) oder durch Fließmittelzugabe vermindert werden. Die Fließmittelzugabe bewirkt eine Dispergierung der Feinstoffe im Leim, verbunden mit einer Abnahme des Scherwiderstands.

4.4 Das Zusammenhaltevermögen des Betons hängt bei gleichem Leimgehalt vom Feinstoffgehalt und vom Wassergehalt des Leims ab. Feinstoffreiche, wasserarme Leime bewirken ein gutes Zusammenhaltevermögen, haben aber ohne Fließmittelzugabe einen hohen Scherwiderstand.

4.5 Die zur Dispergierung der Feinstoffe erforderliche Fließmitteldosierung kann durch Eignungsversuche mit dem Viscomat ermittelt werden. Die im Beton mögliche Dosierung liegt höher, weil Fein- und Grobzuschlag Fließmittelmengen sorbieren, die zur Dispergierung der Feinstoffe nicht mehr zur Verfügung stehen.

4.6 Die Variationen in der stofflichen Zusammensetzung des Leims durch die Zugabe unterschiedlicher mehlfiner Stoffe sowie die Wahl von Leimgehalt und Scherwiderstand des Leims erlauben die Entkoppelung von Frischbeton- und Festbetoneigenschaften. Dabei ist zur Erzielung der erforderlichen Verarbeitungseigenschaften ein ausreichender Leimgehalt vorzusehen, dessen Fließverhalten durch Fließmittel auf die notwendigen Werte eingestellt werden kann.

4.7 Zur Erzielung der geforderten Festbetoneigenschaften sind die Zusammensetzung des Leims und dabei besonders der Zementgehalt und der Wasserzementwert entsprechend zu wählen.

plasticizers in general experience a greater increase in consistency than pastes with lower shear resistances due to the water/cement ratio.

With superplasticizers the greatest increase in consistency is therefore achieved when the fines in the paste are very largely dispersed. With concretes with high-fines pastes it is crucial that the flow-table spread can be governed effectively by adding superplasticizer and by changing the paste content.

In addition to the consistency, the cohesive ability of the fresh concrete is also of decisive importance for workability and compaction. The load-bearing capacity of the paste, and hence the cohesive ability of the concrete, can be raised by increasing the proportion of solids in the paste by other flour-fine materials such as limestone meal, fly ash or silica fume (Fig. 2). As already explained, with an appropriate addition of superplasticizer these high-fines pastes permit an increase in the flow-table spread which has proven efficient in practice. The consistency of concretes which are low in cement paste or have cement pastes with inadequate load-carry capacities due to excessive quantities of mixing water can therefore be increased by increasing the total paste content at constant cement and water content by adding further flour-fine materials and then plasticizing this paste with an admixture. This means that for concrete the workability properties, such as flow-table spread and cohesive ability, can be completely isolated from the properties of the hardened concrete.

Work is currently in hand to establish how the described relationships between the flowability of the paste and the flow-table spread of the concrete can be quantified so that they can be utilized for computer-aided concrete production.

4 Summary

4.1 The workability characteristics of fresh concrete, i.e. its consistency and its cohesive ability, are determined by the paste content, by the rheological properties of the paste and by the grading curve and the particle structure of the aggregates.

4.2 The consistency of the fresh concrete can be increased as well by increasing the paste content as by decreasing the shear resistance of the paste.

4.3 The shear resistance of the paste can be decreased by adding water (increase of the water/cement ratio) or by the use of superplasticizer. The addition of superplasticizer serves to disperse the fines of the paste and thus to considerably lower its shear resistance.

4.4 The cohesive ability of fresh concrete depends for a given paste content on the proportion of fines and the water content of the paste. High-fines, low-water pastes are characterized by their good cohesive ability, but also by their high shear resistance if no superplasticizer is added.

4.5 The dosage of superplasticizer required to disperse the fines can be determined by means of suitability tests using the viscomat. The dosage required in concrete is higher since fine and coarse aggregates absorb quantities of superplasticizer that are thus no longer available for the dispersion of the fines.

4.6 The variation of the matricial composition of the paste by the use of different fines as well as the appropriate choice of the content and the shear resistance of the paste permit to decouple the properties of fresh concrete from those of hardened concrete. To obtain the necessary workability characteristics, a sufficient content of paste must be chosen, and its flow behaviour must be adjusted to the values required by adding superplasticizer.

4.7 To obtain the necessary properties of the hardened concrete, the composition of the paste, and in particular its cement and water content must be chosen in accordance with requirements.

SCHRIFTTUM/LITERATURE

[1] DIN 1045 – Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung, Ausgabe 07.88
[2] Walz, K.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch das Verdichtungsmaß. *beton* 14 (1964) H. 11, S. 505–509; ebenso: *Betontechnische Berichte* 1964, Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 207–224
[3] Albrecht, W. und Schäffler, H.: Konsistenzmessung von Beton. *DAfStb*, H. 158, Berlin 1964
[4] Pilny, F.: Die Messung von Steife und Rüttelwilligkeit bei Frischbeton. *Der Bauingenieur* 33 (1958) H. 5, S. 169–174
[5] Werse, H.P.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch eine Auslaufzeit. *beton* 22 (1972) H. 10, S. 437–440

[6] DIN 1048 – Prüfverfahren für Beton; Teil 1, Frischbeton, Festbeton – besonders hergestellter Probekörper, Ausgabe 06.91
[7] Bonzel, J. und Krell, J.: Konsistenzprüfung von Frischbeton. *beton* 34 (1984), H. 2, S. 61–65 und H. 3, S. 101–104; ebenso: *Betontechnische Berichte* 1984/85, Beton-Verlag, Düsseldorf 1986, S. 17–40
[8] ASTM C 232 – 87 Standard Test Methods for Bleeding of Concrete
[9] Lieber, W.: Das Sedimentieren (Bluten) von Zementen. *Zement-Kalk-Gips* 21 (1986) H. 11, S. 457–463
[10] Spanka, G., Grube, H., und Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. *Beton* 45 (1995) H. 11, S. 802–808, H. 12, S. 876 / 881

-
- [11] Wesche, K. und vom Berg, W.: Rheologische Eigenschaften von Zementleim und Frischbeton. *beton* 23 (1973) H. 1, S. 21-27; ebenso: *Belontechnische Berichte* 14 (1973), Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 21-40
- [12] Vom Berg, W.: Zum Fließverhalten von Zementsuspensionen. Dissertation, TH Aachen 1982
- [13] Flatten, H.: Untersuchungen über das Fließverhalten von Zementleim. Dissertation, TH Aachen 1973
- [14] Banfill, P.F.G.: Use of the ViscoCorder to Study the Rheology of Fresh Mortar. *Magazine of Concrete Research* 42 (1990) Nr. 153, S. 213-221
- [15] Tattersall, G.H.: Rheology of Portland Cement Paste. *British Journal of Applied Physics* 6 (1955) Nr. 5, S. 165-167
- [16] Chioocchio, G. und Paolini, A. E.: Optimum Time for Adding Superplasticizers to Portland Cement Pastes. *Cement and Concrete Research* 15 (1985), S. 901-908
- [17] Mangialardi, T. und Paolini, A. E.: Workability of Superplasticized Microsilica - Portland Cement Concretes. *Cement and Concrete Research* 18 (1988), S. 351-362
- [18] Aitcin, P.C., Joliceur, C. und MacGregor, J. G.: Superplasticizers: How They Work and Why They Occasionally Don't. *Concrete International* (1994), S. 45-52
- [19] Schwanda, F.: Das technische Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumes und Zementleimanspruches von Zuschlägen und seine Bedeutung für den Spannbetonbau. *Zement und Beton* 37 (1966) S. 8-17