

# Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton

## Controlling the workability properties of self compacting concrete used as ready-mixed concrete

### Übersicht

Selbstverdichtende Betone (SVB) zeichnen sich durch ihre besonderen Frischbetoneigenschaften aus. Selbstverdichtende Eigenschaften sind jedoch nur durch konsequente Optimierung der Ausgangsstoffe sowie des Herstellvorgangs zu erreichen. Bei der Verwendung von SVB als Transportbeton kommt es darauf an, dass der Beton zum Einbaupunkt die benötigten Frischbetoneigenschaften aufweist. Die Zeitspanne zwischen Mischungsende und Einbaubeginn kann dabei mehr als 90 min betragen. Dies erfordert im Gegensatz zur Verwendung von SVB in Fertigteilwerken die Berücksichtigung der zeitlichen und temperaturabhängigen Veränderungen der Verarbeitbarkeitseigenschaften über einen längeren Zeitraum. Dazu sind ausreichende Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen den verwendeten mehlfinen Stoffen, dem Wassergehalt und der Wirkungsweise des Fließmittels erforderlich. Die Einflüsse der Betonausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Ausgangsfließverhalten, das Ansteifverhalten und die Dauer der Verarbeitbarkeit wurden durch Laborprüfungen ermittelt. Kontrollprüfungen an Betonen, die mit den gleichen Ausgangsstoffen und gleicher Zusammensetzung im Transportbetonwerk unter praxisnahen Bedingungen hergestellt wurden, zeigen, dass die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf Praxisbedingungen gegeben ist. Alle untersuchten Betone zeigten anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften.

### Abstract

Self compacting concretes (SCC) are distinguished by their special fresh concrete properties. However, self compacting properties can only be achieved by persistent optimization of the starting materials and of the production method. When SCC is used as ready-mixed concrete it is important that the concrete still exhibits the required fresh concrete properties at the time when it is placed. The time span between end of mixing and start of placement can be more than 90 minutes. Unlike with the use of SCC in precast element plants this means that the changes in workability characteristics with time and as a function of temperature have to be taken into account. This requires an adequate understanding of the interactions between the powder materials used, the water content and the mode of operation of the plasticizer. The influence of the concrete starting materials and of the concrete composition on the initial flowability, the stiffening behaviour and the duration of workability were determined by laboratory tests. Check tests on concretes produced with the same starting materials and the same composition in a ready-mixed concrete plant under realistic conditions show that the laboratory results are also applicable to practical conditions. All the concretes investigated exhibited solid concrete properties which complied with the requirements.

---

### 1 Einleitung

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Beton, der entmischungsfrei unter dem Einfluss der Schwerkraft nahezu bis zum Niveaueausgleich fließt, dabei entlüftet sowie die Bewehrungsräume und die Schalung vollständig ausfüllt [1]. Er ist ein Hochleistungsbeton, dessen besonderes Leistungsvermögen sich auf die Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ bezieht. Wie bei anderen Hochleistungsbetonen (z.B. hochfester Beton, säureresistenter Beton) werden die besonderen, von üblichen Normalbetonen abweichenden Eigenschaften dieser Betone nur durch konsequente Optimierung, sowohl der einzelnen Ausgangsstoffe als auch der Zusammensetzung, erreicht. Die Wechselwirkungen zwischen dem Mehlkorn (Zement und Zusatzstoffe mit einem Korndurchmesser < 0,125 mm), Wasser und Fließmittel bestimmen in erster Linie die Fließfähigkeit und die Mischungsstabilität des SVB. Die Abstufung der einzelnen Korngruppen der Gesamtsieblinie beeinflusst darüber hinaus die Eigenschaften des Betons, durch Bewehrungshindernisse nicht blockiert zu werden.

Es hat sich gezeigt, dass die für Selbstverdichtung benötigten Verarbeitbarkeitseigenschaften nicht wie bei Rüttelbeton relativ einfach über längere Zeit aufrecht erhalten werden können. Während Schwankungen in der Verarbeitbarkeit von Rüttelbeton weitgehend durch die angewendete Rüttelintensität während der Verarbeitung ausgeglichen werden können, ist dies bei SVB nicht möglich. Daraus ergibt sich, dass die durch Herstellung und

### 1 Introduction

Self compacting concrete (SCC) is a concrete which flows to a virtually uniform level under the influence of gravity without segregation, during which it de-aerates and completely fills the formwork and the spaces between the reinforcement [1]. It is a high-performance concrete with the special property of the fresh concrete of “self compacting”. As with other high-performance concretes (e.g. high-strength concrete, acid-resistant concrete) the special properties of these concretes which differ from normal concretes are achieved only by systematic optimization both of the individual constituents and of the composition. The flowability and mix stability of the SCC are determined primarily by the interactions between the powder (cement and additions with a particle diameter < 0.125 mm), water and plasticizer. The gradation of the individual size groups in the overall grading curve also affects the property of the concrete of not being blocked by the reinforcement.

It has been found that, in contrast to vibrated concrete, the workability properties required for self compaction cannot be maintained relatively easily over a fairly long period. Fluctuations in the workability of vibrated concrete can be largely offset by the intensity of vibration applied during placement, but this is not possible with SCC. The effects of production and transport on the workability properties of SCC must therefore be taken into account in the initial testing. SCC in a precast element plant, for example, is normally placed about 10 min to 30 min after mixing,

Transport bedingten Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften von SVB schon in der Erstprüfung berücksichtigt werden müssen. Während z.B. SVB im Fertigteilwerk i.d.R. etwa 10 min bis 30 min nach dem Mischen verarbeitet ist, beträgt diese Zeitspanne bei Transportbeton häufig 30 min bis zu 120 min. Zudem muss für ein Ortbetonbauteil i.d.R. eine sehr große Zahl einzelner Mischungen mit weitgehend gleichen Verarbeitbarkeitseigenschaften unter sehr vielfältigen Bedingungen auf der Baustelle bereitgestellt werden. Die zusätzlichen Einflüsse liegen u.a. in den stark schwankenden Witterungsbedingungen (Temperatur, Wasserverdampfungsrate) und darin, dass der bereits im Bauteil vorhandene Beton die gleichen Verarbeitbarkeitseigenschaften aufweisen muss wie der neu angelieferte. Unterbrechungen in der Anlieferung können deshalb nachteiligere Folgen haben als bei Rüttelbeton. Von großer Bedeutung ist somit auch die Frage, welche Korrekturmöglichkeiten auf der Baustelle bestehen, wenn der angelieferte SVB nicht den Anforderungen entspricht. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wird zurzeit in einem Gemeinschaftsforschungsvorhaben mit der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB), die die Untersuchungen finanziell fördert, die zielsichere Herstellung von SVB als Transportbeton unter Verwendung der in den Betonwerken vorhandenen Rohstoffe und Anlagen erforscht. Dieser Bericht behandelt Untersuchungen zu folgenden Fragen:

- Auswirkungen von geringen Abweichungen in der Wasserdosierung auf das Ausgangsfließverhalten
- Ansteifverhalten in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasser- und Fließmitteldosierung
- Korrekturmöglichkeiten auf der Baustelle durch Fließmittel- oder Wasserzugabe bei ausreichender Mischungsstabilität

Die Untersuchungen an Laborbetonen wurden durch Untersuchungen an Betonen, die in einem Transportbetonwerk hergestellt wurden, überprüft.

## 2 Rheologische Eigenschaften und Prüfverfahren

Die rheologischen Eigenschaften der aus Zement, Betonzusatzstoffen, Zugabewasser und Fließmittel bestehenden Mehlkornsuspension werden vom Wasserfeststoffverhältnis und vom Fließmittelgehalt bestimmt. Als Zugabewasser ist mindestens der Sättigungswassergehalt vorzusehen. Dies ist der Wassergehalt, der erforderlich ist, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und die Hohlräume des Mehlkornhaufwerks zu füllen. Er kennzeichnet den Übergang zwischen einem Kornhaufwerk und einer Suspension, an dem sich die scheinbare Kohäsion verliert und das Korngemisch bei Energieeinwirkung zu fließen beginnt, siehe Bild 1 (nach [2]). Ab diesem Wassergehalt sind die Suspensionseigenschaften durch Wasser und Fließmittel steuerbar. Bild 2 zeigt schematisch den Einfluss des Wasser- und des Fließmittelgehalts auf die Suspensionseigenschaften von Mehlkornleimen. Dieses Bild veranschaulicht das durch viele Untersuchungen (z.B. [3]) bestätigte rheologische Verhalten von Zement- bzw. Mehlkornsuspensionen, das dem eines Bingham-Körpers entspricht und durch das Bingham-Modell abgebildet werden kann [3]. Die rheologischen Eigenschaften von Zementleim- bzw. Mehlkornsuspensionen können mit Baustoffrheometern wie dem Viskomat NT [4] bestimmt und in Form von Fließkurven dargestellt werden. In diesen Versuchen werden bei verschiedenen Umdrehungsgeschwindigkeiten  $N$  (1/min) die durch die Suspension übertragenen Scherwiderstände  $T$  (Nmm) gemessen und aufgetragen. Wegen der Gültigkeit des Bingham-Modells können aus diesen Messpunkten die relative Fließgrenze  $g$  und die relative dynamische Viskosität  $h$  nach der Formel  $T = g + h \cdot N$  abgeleitet werden. Wassergehalt und Fließmittelmenge beeinflussen die Kenngrößen  $g$  und  $h$  unterschiedlich: Eine steigende Fließmittelmenge setzt die Fließgrenze  $g$  herab, während eine steigende Wassermenge die Fließgrenze  $g$  und die Viskosität  $h$  vermindert (siehe Bild 2).

Als Messverfahren zur Bestimmung des Fließverhaltens von Beton haben sich das Setzfließmaß  $s_m$  [5, 6, 7] und die relative Trichtergeschwindigkeit  $R$  [5, 6] bewährt. Während das Setzfließmaß überwiegend von der Fließgrenze  $g$  beeinflusst wird, hängt die relative Trichtergeschwindigkeit überwiegend von der dynamischen Viskosität  $h$  ab.

but with ready-mixed concrete this time span is often 30 min up to 120 min. In addition, it is usually also necessary to provide a very large number of individual mixes with substantially the same workability properties under very diverse conditions on the building site for a cast-in-place concrete component. The additional influencing factors are, among others, the sharply fluctuating weather conditions (temperature, rate of water evaporation) and the fact that the concrete already present in the component must have the same workability properties as the newly delivered concrete. Interruptions in the supply can therefore have worse consequences than with vibrated concrete. Also crucial is the question of the means of correction available on the building site if the delivered SCC does not meet the requirements. Dependable production of SCC as ready-mixed concrete using the constituent materials and equipment available at the concrete plant is currently being investigated at the Research Institute of the Cement Industry in a joint research project with the FTB (Ready-mixed Concrete Research Association) which is financing the investigations.

This report deals with investigations into the following questions:

- effects of small deviations in the water addition on the initial flow behaviour
- stiffening behaviour as a function of the quantities of water and plasticizer added
- corrections that can be carried out at the building site by addition of plasticizer or water while maintaining adequate mix stability

The investigations carried out on laboratory concretes were checked by investigations on concretes produced in a ready-mixed concrete plant.

## 2 Rheological properties and test methods

The rheological properties of the powder suspension, consisting of cement, concrete additions, mixing water and plasticizer, are determined by the water/solids ratio and the plasticizer content. The planned quantity of mixing water should be at least as high as the saturation water content. This is the water content that is necessary to wet the surfaces of the solid particles and to fill the voids in the particulate mass of powder. It characterizes the transition between a particulate mass and a suspension at which the apparent cohesion is lost and the particle mix begins to flow on application of energy, see Figure 1 (according to [2]). Above this water content the properties of the suspension can be controlled by water and plasticizer. The influence of the water content and plasticizer content on the suspension properties of pastes is shown schematically in Figure 2. This diagram illustrates the rheological behaviour (confirmed by many investigations (e.g. [3])) of suspensions of cement or powder which corresponds to that of a Bingham solid and is represented by the Bingham model [3]. The rheological properties of cement paste suspensions or powder suspensions can be determined with building materials rheometers, such as the Viskomat NT [4], and represented in the form of flow curves. In these tests the associat-

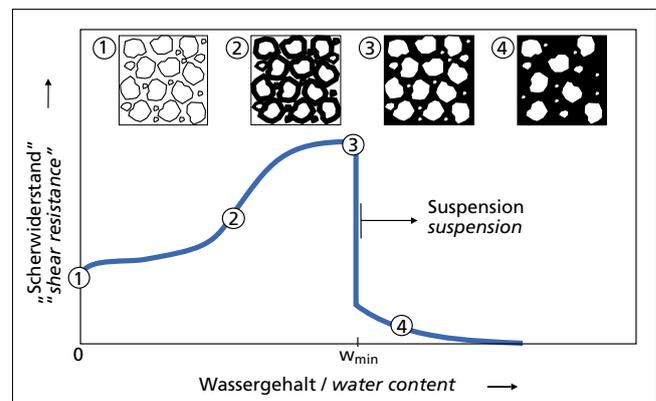


Bild 1: Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt beim Übergang eines Kornhaufwerks in eine Suspension, siehe auch [2]  
Figure 1: Shear resistance as a function of water content during the conversion of a particulate mass into a suspension, see also [2]

Für die Beurteilung des Fließverhaltens von Beton eignet sich die Darstellung dieser beiden Prüfgrößen gemäß Bild 3. In Abhängigkeit von Setzfließmaß  $sm$  und relativer Trichtergeschwindigkeit  $R$  kann ein Bereich eingegrenzt werden, in dem erfahrungsgemäß ausreichend verarbeitbare, d.h. fließfähige und entmischungsarme SVB liegen. Außerhalb dieses Bereichs liegen Betonzusammensetzungen, die zu Sedimentation neigen bzw. nicht ausreichend entlüften oder nicht ausreichend fließen (Stagnation). Der vierte Eckbereich ist physikalisch nicht möglich, was auch durch viele Untersuchungen gezeigt werden konnte.

Durch die Lage der Messgrößen  $sm$  (Setzfließmaß) und  $R$  (relative Trichtergeschwindigkeit) im Diagramm (Bild 3) werden Veränderungen im Wasser- und Fließmittelgehalt beurteilbar, so dass eventuell notwendige Korrekturen gezielt vorgenommen werden können.

Die Entmischungsneigung von SVB kann mit dem Tauchstab [7] überprüft werden.

Das Verhalten des Betons, durch Bewehrungshindernisse in seinem Fließverhalten blockiert zu werden, kann sehr zuverlässig durch die Prüfung des Setzfließmaßes mit Blockiererring [7] oder auch mit dem Box Test [6] ermittelt werden.

### 3 Laboruntersuchungen

#### 3.1 Anforderungen an den Beton

Die untersuchten Betone wurden so zusammengesetzt, dass sie die Anforderungen an die Expositionsclassen XC1/XC2 entsprechend DIN EN 206-1, DIN 1045-2 [9, 10], d.h. an Innenraumbeton erfüllten. Es handelte sich um Betone des Mehlkorntyps (siehe [5]) mit einem Mehlkorngehalt von etwa  $550 \text{ kg/m}^3$ .

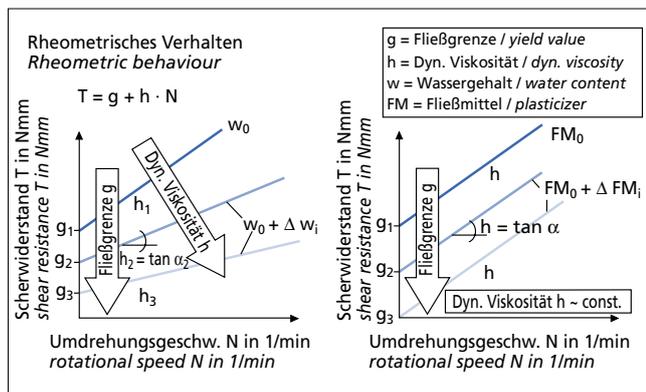
Als Zielvorgabe für die Laborprüfungen galten folgende Anforderungen: Das Setzfließmaß  $sm$  soll zwischen  $60 \text{ cm}$  und  $75 \text{ cm}$ , die relative Trichtergeschwindigkeit  $R$  zwischen  $0,45 \text{ s}^{-1}$  und  $1,0 \text{ s}^{-1}$  liegen. Im Box Test muss eine Steighöhe von mindestens  $32 \text{ cm}$  erreicht werden. Die SVB müssen diese Eigenschaften nach der Herstellung mindestens  $2 \text{ h}$  lang aufweisen, damit genügend Zeit für Transport und Einbau vorhanden ist.

In der Praxis sind die hier untersuchten Zusammenhänge durch gezielte ausreichende Erstprüfungen im Labor zu untersuchen und durch Kontrollprüfungen an werkmäßig hergestellten Betonen zu überprüfen.

#### 3.2 Ausgangsstoffe

##### 3.2.1 Zement und Betonzusatzstoffe

Die Zusammensetzung des Mehlkornmischs im Beton richtete sich nach dem Mindestzementgehalt sowie nach dem höchstzulässigen Wasserzementwert gemäß DIN 1045-2 [10] für die Expositionsclassen XC1/XC2 bei einem gesamten Mehlkorngehalt von rd.  $550 \text{ kg/m}^3$ . Daraus ergibt sich ein Zementgehalt von  $240 \text{ kg/m}^3$  und ein Flugaschegehalt von  $310 \text{ kg/m}^3$ . Als Zement wurde ein CEM III/A 32,5 N und als Betonzusatzstoff eine Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 [8] verwendet. Der Wasseranspruch des



**Bild 2:** Einfluss von Zugabewasser und von Fließmittel auf die rheologischen Eigenschaften von Zement- bzw. Mehlkornsuspensionen  
**Figure 2:** Influence of mixing water and plasticizer on the rheological properties of suspensions of cements and powder

end shear resistances  $T$  (Nmm) transmitted by the suspension were measured and plotted at different rotational speeds  $N$  (rpm). Because of the validity of the Bingham model the relative yield value  $g$  and the relative dynamic viscosity  $h$  can be derived from these measurements using the formula  $T = g + h \cdot N$ . The water content and quantity of plasticizer affect the parameters  $g$  and  $h$  in different ways: an increasing quantity of plasticizer lowers the yield value  $g$ , while an increasing quantity of water reduces both the yield value  $g$  and the viscosity  $h$  (see Figure 2).

The slump flow  $sm$  [5, 6, 7] and the relative funnel speed  $R$  [5, 6] have proved successful as test methods for determining the flow behaviour of concrete. The slump flow is influenced predominantly by the yield value  $g$  but the relative funnel speed depends mainly on the dynamic viscosity  $h$ .

The representation of these two test variables shown in Figure 3 is a suitable way of assessing the flow behaviour of concrete. The slump flow  $sm$  and the relative funnel speed  $R$  can be used to delimit an area in which experience shows that there is adequate workability, i.e. a free-flowing SCC with hardly no segregation. Outside this area lie concrete compositions which have a tendency to sedimentation or do not have adequate de-aeration or do not flow sufficiently (stagnation). The fourth corner region is physically impossible, as has been demonstrated by many investigations.

Changes in water content and plasticizer content can be assessed from the position of the measured variables  $sm$  (slump flow) and  $R$  (relative funnel flow speed) in the diagram (Figure 3) so that any corrections which may become necessary can be undertaken selectively.

The tendency of SCC to segregation can be checked with a plunger [7].

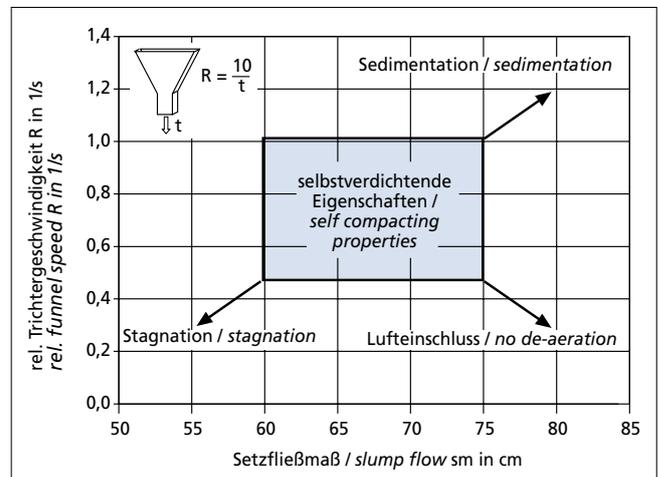
The tendency of the concrete flow to be blocked by reinforcement can be determined very reliably by testing the slump flow with a J-ring [7] or with the box test [6].

### 3 Laboratory investigations

#### 3.1 Concrete requirements

The compositions of the concretes investigated were such that they fulfilled the requirements for exposure classes XC1/XC2 as specified in DIN EN 206-1, DIN 1045-2 [9,10], i.e. for interior concrete. This involved concretes of the powder type (see [5]) with a powder content of about  $550 \text{ kg/m}^3$ .

The objectives for the laboratory tests were as follows: the slump flow  $sm$  should lie between  $60 \text{ cm}$  and  $75 \text{ cm}$  and the relative funnel speed  $R$  should lie between  $0.45 \text{ s}^{-1}$  and  $1.0 \text{ s}^{-1}$ . A height of rise of at least  $32 \text{ cm}$  must be achieved in the box test. The SCC must exhibit these properties for at least  $2 \text{ h}$  after production, so that there is sufficient time available for transport and placement.



**Bild 3:** Selbstverdichtende Eigenschaften in Abhängigkeit vom Setzfließmaß und der relativen Trichtergeschwindigkeit  
**Figure 3:** Self compacting properties as a function of slump flow and relative funnel speed

Zements betrug 30,5 M.-%, der der Flugasche 31,5 M.-%. Der Erstarrungsbeginn des Zements lag bei 195 min.

Mit Hilfe des  $\beta$ -Wert-Verfahrens [5, 6] wurden der Zement und die Flugasche sowie das Mehlkorngemisch granulometrisch beurteilt sowie der Sättigungswassergehalt (siehe Abschnitt 2) für die Betonmischungen bestimmt. Die Sättigungswassergehalte entsprachen für den Zement einem Wasserfeststoff-Volumenverhältnis von 1,05, für die Flugasche von 0,65 und für die Mehlkornmischung von 0,90. Letzterer Wassergehalt entspricht einem massebezogenen Wasserfeststoffwert von etwa 0,35. Da mit dem  $\beta$ -Wert-Verfahren erfahrungsgemäß höhere Sättigungswassergehalte ermittelt werden, als für den SVB erforderlich sind, wurden die Anfangswassergehalte im Beton demgegenüber um 10 % reduziert und dann in den weiteren Versuchen optimiert.

### 3.2.2 Fließmittel

Für Vorversuche wurden vier Fließmittel mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung auf der Wirkstoffbasis Polycarboxylatether (PCE) ausgewählt, die nach Angabe des Herstellers für den Einsatz in Transportbeton geeignet sind. Von diesen Fließmitteln wurde der Feststoffgehalt durch Abdampfen nach EN 480-8 [11] bestimmt. Der Feststoffgehalt der untersuchten Fließmittel lag bei rd. 35 M.-%. Aufzeichnungen der Infrarotspektrogramme zeigten, dass die Wirkstoffe der vier Zusatzmittel nicht identisch waren. Untersuchungen im Viskomat NT zur Ermittlung der Sättigungskurven [3] lieferten jedoch nahezu identische Sättigungsdosierungen von rd. 0,25 M.-% Fließmittel bezogen auf die Masse des Zements bei geringfügig voneinander abweichenden Scherwiderständen.

Da es bei der Herstellung von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton entscheidend ist, eine ausreichend lange Verarbeitbarkeit zu erzielen, wurde in weiteren Vorversuchen die Wirkungsdauer der einzelnen Fließmittel an Standardbetonzusammensetzungen (Zement = 300 kg/m<sup>3</sup>; Steinkohlenflugasche = 250 kg/m<sup>3</sup>; Zugabewasser = 175 l/m<sup>3</sup>) ermittelt. Diese Standardbetone wurden mit den verschiedenen Fließmitteln auf ein Anfangssetzfließmaß mit Blockiererring von 75 cm eingestellt. Danach wurde im Abstand von jeweils 30 min die Prüfung des Setzfließmaßes mit Blockiererring wiederholt. In diesen Versuchen zeigte sich ein Fließmittel bezüglich Verflüssigung, Dosierungsmenge und Wirkungsdauer als besonders günstig. Die Hauptuntersuchungen wurden deshalb nur mit diesem Fließmittel durchgeführt.

### 3.2.3 Gesteinskörnung

Als Gesteinskörnung wurden Rheinsand und Rheinkies verwendet. Zur Verringerung der Blockierneigung wurde eine Sieblinie in Anlehnung an [5] entworfen und dann in den einzelnen Fraktionen variiert. Die Ermittlung des Blockierverhaltens und die Überprüfung der Verarbeitbarkeit erfolgte mit dem Box Test sowie mit dem Setzfließmaß mit Blockiererring. Das Mörtelvolumen und die Kornabstufungen der groben Gesteinskörnungen waren so gewählt, dass in allen Fällen blockierungsfreies Fließen sichergestellt war. Bild 4 zeigt die Sieblinie SL 2, die in den Hauptuntersuchungen verwendet wurde.

### 3.2.4 Betonzusammensetzung, Herstellung und Prüfungen

Als Ausgangsbeton wurde ein aus Voruntersuchungen optimierter selbstverdichtender Beton gewählt. Untersucht wurden die Auswirkungen von Schwankungen im Wassergehalt von rd.  $\pm 7$  l/m<sup>3</sup> auf den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes, der Trichtergerwindigkeit und der Steighöhe im Box Test. Des Weiteren wurde die Veränderung der Verarbeitbarkeitseigenschaften infolge einer Fließmittelnachdosierung untersucht. Die Zusammensetzungen der Betone sind in Tafel 1 dargestellt.

Die Betonausgangsstoffe wurden in der Reihenfolge Gesteinskörnung, Zement und Flugasche,  $\frac{2}{3}$  Zugabewasser und  $\frac{1}{3}$  Zugabewasser mit Fließmittel in einem 200 l fassenden Laborzwangsmischer 3 min lang nach Fließmittelzugabe gemischt.

Danach wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Setzfließmaß sm
- zugehörige Zeit  $t_{500}$ , die der SVB benötigt, um auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen

In practice the relationships investigated here should be investigated by sufficient selective initial tests in the laboratory and checked by control tests on commercially produced concretes.

## 3.2 Constituents

### 3.2.1 Cement and concrete additions

The composition of the powder mix in the concrete was directed towards minimum cement content and the highest permissible water/cement ratio as specified in DIN 1045-2 [10] for the exposure classes XC1/XC2 with a total powder content of about 550 kg/m<sup>3</sup>.

This gave a cement content of 240 kg/m<sup>3</sup> and a fly ash content of 310 kg/m<sup>3</sup>. The cement used was a CEM III/A 32,5 N cement and the concrete addition was a coal fly ash conforming to DIN EN 450 [8]. The water demand of the cement was 30.5 wt.%, and of the fly ash was 31.5 wt.%. The initial setting time of the cement was 195 min.

The cement and the fly ash as well as the powder mix were assessed granulometrically using the  $\beta$  value method [5, 6], and the saturation water content (see Section 2) was determined for the concrete mixes. The saturation water content corresponded to a volumetric water/solids ratio of 1.05 for the cement, of 0.65 for the fly ash and of 0.90 for the powder mix. This last water content corresponds to a water/solids ratio by weight of about 0.35. Experience shows that the  $\beta$  value method gives higher saturation water contents than are necessary for the SCC so the initial water contents in the concrete were reduced by 10 % from this value and then optimized in the further trials.

### 3.2.2 Plasticizers

Four plasticizers with general building inspectorate approval were chosen for the preliminary trials. These had active ingredients based on polycarboxylate ether (PCE) and according to the manufacturers were suitable for use in ready-mixed concrete. The solids contents of these plasticizers were determined by evaporation in accordance with EN 480-8 [11]. The plasticizers investigated had solids contents of about 35 wt.%. The infrared spectrographic traces showed that the active ingredients of the four plasticizers were not identical. However, the investigations with the Viskomat NT to determine the saturation curves [3] gave virtually identical saturation dosages of about 0.25 wt.% plasticizer relative to the mass of cement, with shear resistances that deviated negligibly from one another.

In the production of self compacting concrete as ready-mixed concrete it is essential to achieve sufficiently long workability, so the duration of action of the individual plasticizers in standard concrete compositions (cement = 300 kg/m<sup>3</sup>, coal fly ash = 250 kg/m<sup>3</sup>, mixing water = 175 l/m<sup>3</sup>) was determined in further preliminary trials. These standard concretes were adjusted with the different plasticizers to give an initial slump flow with J-ring of 75 cm. The slump flow test with J-ring was then repeated at intervals of 30 min. In these tests one plasticizer proved to be particularly suitable with respect to plasticizing effect, quantity added and duration of action. The main investigations were therefore carried out only with this plasticizer.

### 3.2.3 Aggregate

Rhine sand and Rhine gravel were used as aggregates. To reduce the tendency to blocking a grading curve was designed following the procedure in [5] and then varied within the individual fractions. The box test and the slump flow with J-ring were used to determine the blocking behaviour and to check the workability. The mortar volume and the particle size gradings of the coarse aggregates were chosen to ensure blocking-free flow in all cases. Figure 4 shows the SL 2 grading curve which was used in the main investigations.

### 3.2.4 Concrete composition, production and testing

A self compacting concrete optimized from preliminary investigations was chosen as the starting concrete. The investigations covered the effects of fluctuations in water content of about  $\pm 7$  l/m<sup>3</sup> on the time-dependent behaviour of the slump flow, the funnel speed and the height of rise in the box test. The change in work-

- relative Trichtergeschwindigkeit R
- Steighöhe im Box Test
- Setzfließmaß mit Blockkiering  $sm_R$
- zugehörige Zeit  $t_{500R}$ , die der SVB benötigt, um durch den Blockkiering auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen
- ggf. zeitabhängige Eintauchtiefe des Tauchstabs

Diese Prüfungen wurden alle 30 min nach kurzem Aufmischen wiederholt. Als Grenze der Fließfähigkeit wurde ein Setzfließmaß  $sm < 60$  cm festgelegt. Erreichte ein Beton diese Grenze, wurde jeweils 0,2 M.-% Fließmittel in den Mischer nachdosiert und 90 s gemischt. Unmittelbar danach wurden die Frischbetonprüfungen am nachdosierten SVB wiederholt und anschließend im alten Rhythmus fortgeführt.

## 4 Prüfergebnisse

### 4.1 Laborbetone

#### 4.1.1 Variation des Wassergehalts

Die Bilder 5 bis 7 zeigen den Verlauf der gemessenen relativen Trichtergeschwindigkeiten über den zugehörigen Setzfließmaßen für die Betone SVB 1, SVB 2a und SVB 3. Diese Betone unterscheiden sich dadurch, dass der Zugabewassergehalt jeweils um  $\pm 7$  l/m<sup>3</sup> um den optimalen Wassergehalt von 175 l/m<sup>3</sup> bei sonst gleicher Zusammensetzung schwankte (siehe Tafel 1). Alle Betone erfüllten die Anforderungen der Verarbeitbarkeitsprüfungen Box Test und Blockkieringprüfung, solange sie eine ausreichende Fließfähigkeit (Setzfließmaß  $> 60$  cm) aufwiesen. Besonders wurde die Entmischungsneigung der Betone überprüft. Bei Setzfließmaßen über 75 cm und relativen Trichtergeschwindigkeiten über 1,0 s<sup>-1</sup> war die Mischungsstabilität der hier untersuchten Betone mit einem Mehlkorngelalt von 550 kg/m<sup>3</sup> nicht immer gegeben. In Tafel 2 sind die gemessenen Werte der Setzfließmaße und zugehörigen relativen Trichtergeschwindigkeiten der untersuchten Laborbetone zusammengefasst.

Der Beton SVB 2a mit 175 l/m<sup>3</sup> Wasser war nach der Herstellung sehr weich und neigte mit einem Setzfließmaß von 81 cm und einer relativen Trichtergeschwindigkeit von 1,13 s<sup>-1</sup> zum Sedimentieren. Trotzdem fiel die Verarbeitbarkeit innerhalb von 60 min unter die Verarbeitbarkeitsgrenze ab. Optimale selbstverdichtende Eigenschaften besaß der Beton dabei zwischen 20 min und 40 min nach Mischungsende. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel nach 60 min brachte den Beton fast wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück. Nach einer kurzen Übergangszeit von rd. 15 min erreichte der Beton dann optimale selbstverdichtende Eigenschaften für weitere rd. 70 min (siehe Bild 8).

SVB 1 und SVB 3 zeigten ebenfalls ein erhebliches Ansteifen. SVB 1, dem 7 l/m<sup>3</sup> Wasser weniger zugegeben wurde, zeigte einen schnelleren Abfall der Verarbeitbarkeit als SVB 2a. Durch den geringeren Abstand der Teilchen zueinander (geringere Wasserfilmdicken) und durch die neu gebildeten Oberflächen infolge der Anfangsreaktionen des Zements wird die Wirkungsdauer des Fließmittels eingeschränkt. Durch die Nachdosierung nach 30 min konnte das Mehlkorn wieder dispergiert werden. SVB 3 hingegen zeigte wegen des erhöhten Wassergehalts von 182 l/m<sup>3</sup> eine höhere Fließfähigkeit. Jedoch konnte der Beton erst 30 min nach Mischungsende sicher ohne Entmischung eingebaut werden. Danach wies er für eine volle Stunde optimale selbstverdichtende Frischbetoneigenschaften auf. Eine Nachdosierung von 0,2 M.-% Fließmittel im Alter von 120 min brachte den Beton ebenfalls wieder in sein Anfangsfließverhalten zurück und sorgte für eine weitere Verarbeitbarkeitszeit von 2 h.

Erwartungsgemäß wirkten sich Schwankungen im Zugabewassergehalt sowohl auf das Setzfließmaß als auch auf die relative Trichtergeschwindigkeit aus.

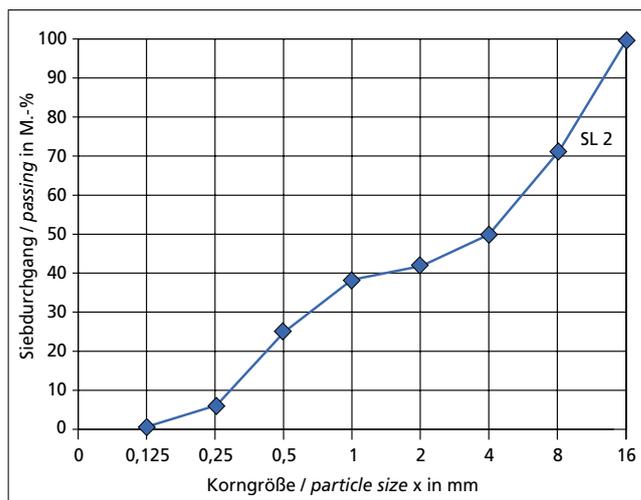


Bild 4: Verwendete Sieblinie der SVB

Figure 4: Grading curves used for the SCC

ability characteristics caused by subsequent addition of plasticizer was also investigated. The compositions of the concretes are shown in Table 1.

The concrete components were mixed in the sequence – aggregate, cement and fly ash, <sup>2</sup>/<sub>3</sub> mixing water and <sup>1</sup>/<sub>3</sub> mixing water with plasticizer – in a 200 l mechanical laboratory mixer for 3 min after addition of the plasticizer.

The following tests were then carried out:

- slump flow  $sm$
- associated time  $t_{500}$  that the SCC requires to flow to a diameter of 500 mm
- relative funnel speed R
- height of rise in the box test
- slump flow with J-ring  $smR$
- associated time  $t_{500R}$  that the SCC requires to flow through the J-ring to a diameter of 500 mm
- where applicable, the time-dependent immersion depth of the plunger

The tests were repeated every 30 min after brief re-mixing. A slump flow  $sm < 60$  cm was set as the limit for flowability. If a concrete reached this limit 0.2 wt.% plasticizer were added to the mixer and mixed for 90 s. Immediately after that the fresh concrete tests were repeated on the SCC with additional plasticizer and then continued in the original pattern.

## 4 Test results

### 4.1 Laboratory concretes

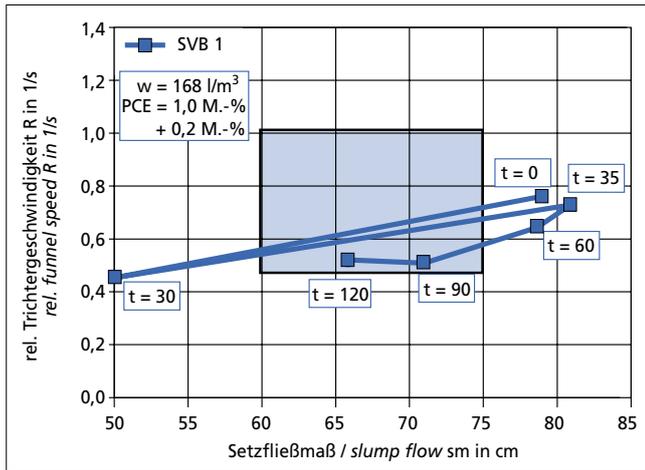
#### 4.1.1 Variation of the water content

Figures 5 to 7 show the behaviour of the measured relative funnel speeds plotted against the associated slump flows for the concretes SCC 1, SCC 2a and SCC 3. These concretes differed from one another in that the mixing water content varied by  $\pm 7$  l/m<sup>3</sup> about the

Tafel 1: Zusammensetzung der Betone für die Laborversuche

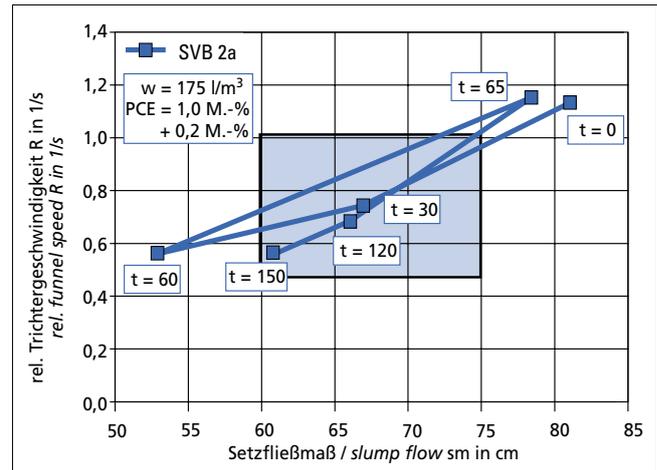
Table 1: Composition of the laboratory concretes

Zusammensetzung der Betone / Concrete composition						
Nr.		SVB 1	SVB 2a	SVB 3	SVB 2b	SVB 2c
CEM III/A 32,5	kg/m <sup>3</sup>	240	240	240	240	240
Flugasche / fly ash	kg/m <sup>3</sup>	310	310	310	310	310
Wasser / water	kg/m <sup>3</sup>	168	175	181	175	175
Fließmittel / plasticizer	kg/m <sup>3</sup>	2,40	2,40	2,40	2,64	2,88
Gesteinskörnung / aggregate	kg/m <sup>3</sup>	1566	1548	1532	1548	1548
Luft / air	Vol.-%	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
(w/z) <sub>eq</sub> / w/c <sub>eq</sub>	–	0,62	0,64	0,67	0,64	0,64



**Bild 5:** Darstellung der relativen Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 1 ( $w = 168 \text{ l/m}^3$ ) mit Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 30 min

**Figure 5:** Plot of the relative funnel speeds against the corresponding slump flows as a function of time for SCC 1 ( $w = 168 \text{ l/m}^3$ ) with additional dosage of plasticizer of 0.2% by mass of c after 30 minutes



**Bild 6:** Darstellung der relativen Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 2a ( $w = 175 \text{ l/m}^3$ ) mit Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 60 min

**Figure 6:** Plot of the relative funnel speeds against the corresponding slump flows as a function of time for SCC 2a ( $w = 175 \text{ l/m}^3$ ) with additional dosage of plasticizer of 0.2% by mass of c after 60 minutes

#### 4.1.2 Variation des Fließmittelgehalts

Die Bilder 6, 9 und 10 zeigen den Verlauf der gemessenen relativen Trichtergeschwindigkeiten über den zugehörigen Setzfließmaßen für den Beton SVB 2a mit unterschiedlichen Fließmittelgehalten. Diese Betone unterschieden sich dadurch, dass sie bei dem optimalen Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  und sonst gleicher Zusammensetzung unterschiedliche Fließmitteldosierungen aufwiesen (siehe Tafel 1). Alle Betone erfüllten die Anforderungen an die Steighöhe im Box Test und an das Setzfließmaß mit Blockkiering, solange sie eine ausreichende Fließfähigkeit (Setzfließmaß  $> 60 \text{ cm}$ ) aufwiesen. Auch hier war die Stabilität der Mischung gegeben, wenn die Werte Setzfließmaß  $\text{sm} < 75 \text{ cm}$  und Trichtergeschwindigkeit  $R < 1 \text{ s}^{-1}$  betragen.

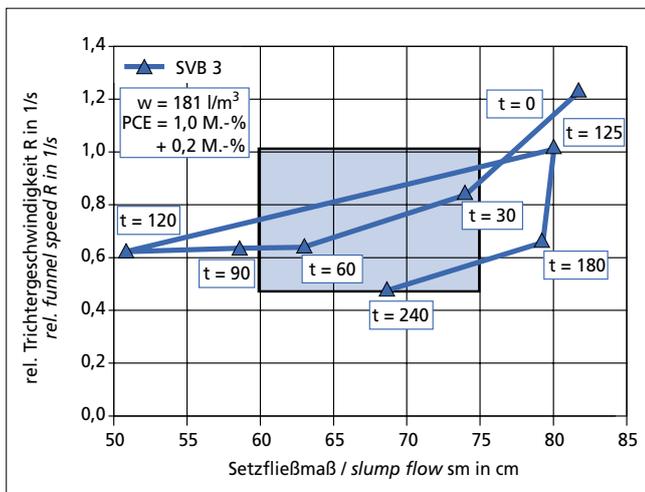
Die Bilder 9 und 10 verdeutlichen den Einfluss der Fließmittelmenge auf das Setzfließmaß über die Zeit und damit auf die Verarbeitbarkeitszeit. Durch die etwas erhöhte Fließmitteldosierung konnte die Verarbeitbarkeitszeit deutlich verlängert werden.

optimum water content of  $175 \text{ l/m}^3$  with otherwise the same composition (see Table 1). All concretes fulfilled the requirements of the workability tests, namely the box test and J-ring test, for as long as they had adequate flowability (slump flow  $> 60 \text{ cm}$ ). A particular check was made on the tendency of the concretes to segregate. For slump flows over  $75 \text{ cm}$  and relative funnel speeds over  $1.0 \text{ s}^{-1}$  the concrete mixes investigated here with a powder content of  $550 \text{ kg/m}^3$  were not always stable. The measured values of the slump flow and associated relative funnel speeds of the laboratory concretes investigated are listed in Table 2.

Concrete SCC 2a with  $175 \text{ l/m}^3$  water was very fluid after production; it had a slump flow of  $81 \text{ cm}$  and relative funnel speed of  $1.13 \text{ s}^{-1}$ , and had a tendency to sedimentation. In spite of this the workability dropped below the workability limit within 60 min. The concrete had optimum self compacting characteristics between 20 min and 40 min after the end of mixing. Subsequent addition of 0.2 wt.% plasticizer after 60 min brought the concrete back to almost its initial flow behaviour. After a short transition time of about 15 min the concrete then achieved optimum self compacting properties for a further period of about 70 min (see Figure 8).

SCC 1 and SCC 3 also exhibited substantial incipient stiffening. SCC 1 to which  $7 \text{ l/m}^3$  too little water had been added exhibited a more rapid drop in workability than SCC 2a. The duration of action of the plasticizer was restricted due to the smaller distance between the particles (smaller water film thickness) and to the newly formed surfaces resulting from the initial reactions of the cement. The powder was dispersed again by the subsequent addition of plasticizer after 30 min. SCC 3, on the other hand, exhibited higher flowability because of the increased water content of  $182 \text{ l/m}^3$ . However, it was 30 min after the end of mixing before the concrete could be placed safely without segregation. After that it exhibited optimum self compacting fresh concrete properties for a full hour. Subsequent addition of 0.2 wt.% plasticizer at 120 min also brought the concrete back to its initial flow behaviour and ensured a further workability period of 2 h.

As expected, fluctuations in the mixing water content affected both the slump flow and the relative funnel speed.



**Bild 7:** Darstellung der relativen Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 3 ( $w = 181 \text{ l/m}^3$ ) mit Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 120 min

**Figure 7:** Plot of the relative funnel speeds against the corresponding slump flows as a function of time for SCC 3 ( $w = 181 \text{ l/m}^3$ ) with additional dosage of plasticizer of 0.2% by mass of c after 120 minutes

#### 4.1.2 Variation in the plasticizer content

Figures 6, 9 and 10 show the behaviour of the measured relative funnel speeds plotted against the associated slump flows for the concrete SCC 2a containing different levels of plasticizer. These concretes differed in that they had the optimum water content of  $175 \text{ l/m}^3$  and otherwise the same composition but with different quantities of added plasticizer (see Table 1). All concretes fulfilled

Entsprechend den höheren Dosierungsmengen waren die Betone SVB 2b und SVB 2c wegen anfänglicher Entmischungsneigung erst zu späteren Zeitpunkten einbaubar (SVB 2b nach rd. 30 min und SVB 2c nach rd. 45 min), wiesen dann jedoch eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit auf. Darüber hinaus wäre eine weitere Fließmittelnachdosierung zu späteren Zeitpunkten auch möglich gewesen. Die Entmischungsneigung wird auch durch die Schnittbilder in Bild 10 deutlich. Der Beton SVB 2c mit einer 20 % höheren Dosierung des Fließmittels neigte direkt nach dem Mischen zum Absetzen (rechtes Schnittbild), zeigte nach 60 min jedoch eine ausreichende Stabilität (linkes Schnittbild). Dieses Verhalten ist am frischen Beton auch mit dem Tauchstabverfahren [7] erkennbar.

#### 4.2 Überprüfung der Frischbetoneigenschaften an einem im Transportbetonwerk hergestellten SVB

Um die Ergebnisse aus dem Labor zu überprüfen, wurde ein selbstverdichtender Beton SVB P1 mit einer Zusammensetzung entsprechend SVB 2b im Transportbetonwerk hergestellt und seine Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Dabei war besonders zu beachten, dass die Gesteinskörnungen je nach Fraktion Eigenfeuchten von 1 M.-% bis 5 M.-% besitzen. Dies erschwert auf der einen Seite eine genaue Wasserdosierung. Auf der anderen Seite sind diese Gesteinskörnungen dadurch in der Regel wassergesättigt, so dass ein Wasserverlust durch Saugen nicht vorkommt. Zur Herstellung des SVB wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Um zu vermeiden, dass dem Beton mehr Wasser als benötigt zugegeben wird, wurde unter Berücksichtigung der Eigenfeuchte etwa 10 l Wasser pro m<sup>3</sup> Beton planmäßig weniger eingewogen. Die Anfangskonsistenz des SVB ohne Fließmittel wurde dann augenscheinlich durch weitere Wasserzugabe eingestellt. Danach wurde

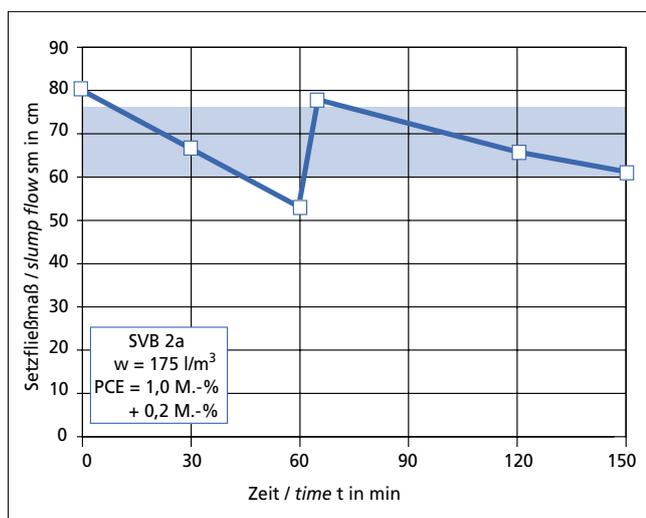
**Tafel 2: Setzfließmaße und zugehörige relative Trichtergeschwindigkeiten der untersuchten Laborbetone**  
**Table 2: Slump flows and associated relative funnel speeds of the laboratory concretes investigated**

Frischbetonkennwerte / Parameters of fresh concrete sm, R										
Alter / Age	SVB 1		SVB 2a		SVB 3		SVB 2b		SVB 2c	
	sm	R	sm	R	sm	R	sm	R	sm	R
[min]	[cm]	[1/s]	[cm]	[1/s]	[cm]	[1/s]	[cm]	[1/s]	[cm]	[1/s]
0	79	0,77	81	1,13	82	1,23	78	0,90	82	0,87
30	50	0,46	67	0,75	74	0,83	73	0,83	78	0,67
35	81*	0,74*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
60	78	0,62	53	0,57	63	0,66	66	0,81	74	0,61
65	n.b.	n.b.	78*	1,14*	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
90	72	0,48	n.b.	n.b.	58	0,66	61	0,73	70	0,53
120	66	0,49	66	0,71	51	0,62	60	0,61	68	0,46
125			n.b.	n.b.	80*	1,01*			n.b.	n.b.
150			61	0,57	n.b.	n.b.			66	0,46
180					78	0,64			64	0,45
240					68	0,49				

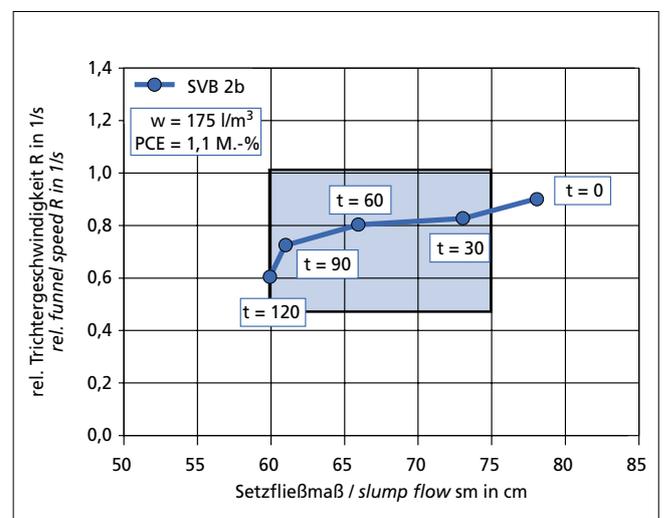
\* Kennwert nach FM-Nachdosierung / Parameter after additional plasticizer dosage

the requirements on the height of rise in the box test and on the slump flow with J-ring for as long as they had adequate flowability (slump flow > 60 cm). Here again the mix was stable when the slump flow sm was < 75 cm and funnel speed R was < 1 s<sup>-1</sup>.

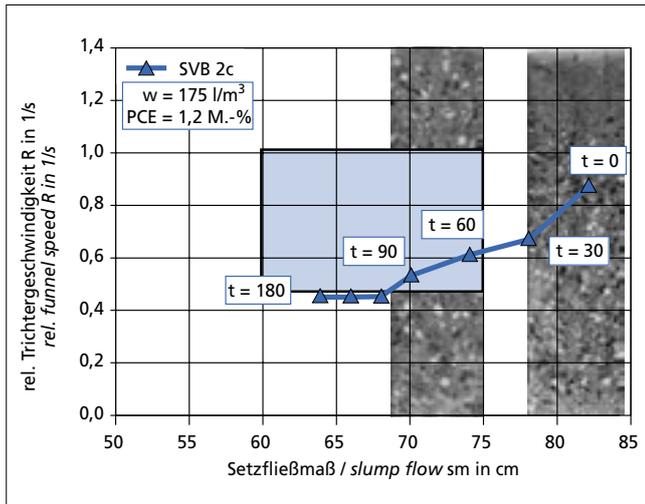
Figures 9 and 10 illustrate the influence of the quantity of plasticizer on the slump flow over time and hence on the workability period. The workability period was significantly prolonged by the somewhat increased dosage of plasticizer. Corresponding to the higher dosages the concretes SCC 2b and SCC 2c could only be placed at later times because of the initial tendency to segregation (SCC 2b after about 30 min and SCC 2c after about 45 min) but they then exhibited adequately long workability times. Subsequent addition of plasticizer at some later time would also have been possible. The tendency to segregation is also clear from the sections shown in Figure 10. The SCC 2c concrete with an extra 20 % of plasticizer tended to settle directly after mixing (right-hand section) but exhibited adequate stability after 60 min (left-hand section). This behaviour can also be detected in the fresh concrete by the plunger method [7].



**Bild 8: Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes für den SVB 2a mit Fließmittelnachdosierung in Höhe von 0,2 M.-% v. z nach 60 min**  
**Figure 8: Behaviour of the slump flow with time for SCC 2a with additional dosage of plasticizer of 0.2% by mass of c after 60 minutes**



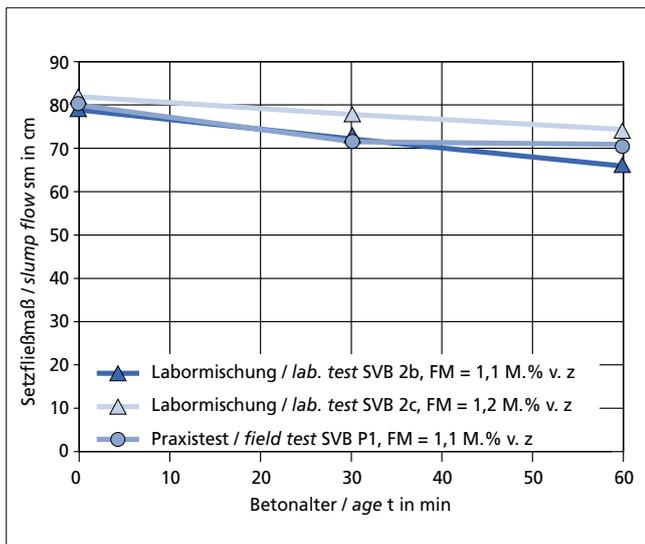
**Bild 9: Darstellung der relativen Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 2b**  
**Figure 9: Plot of the relative funnel speed against the corresponding slump flow as a function of time for SCC 2b**



**Bild 10:** Darstellung der relativen Trichtergeschwindigkeiten über den entsprechenden Setzfließmaßen in Abhängigkeit von der Zeit für SVB 2c

**Figure 10:** Plot of the relative funnel speed against the corresponding slump flow as a function of time for SCC 2c

90 % der vorgesehenen Fließmittelmenge zugegeben und der Beton ausreichend gemischt. Anschließend wurden die Fließfähigkeit und die Viskosität des SVB mit dem Setzfließmaß und zugehöriger  $t_{500}$ -Zeit überprüft, erforderlichenfalls durch weitere Fließmittelzugabe auf den Wert des planmäßigen Ausgangsfließmaßes gebracht und dann in einen Fahrmischer gefüllt. Die Chargengröße betrug jeweils  $1,5 \text{ m}^3$ . Danach wurden nach 30 min und 60 min das Setzfließmaß mit zugehöriger  $t_{500}$ -Zeit, die Trichterausfließzeit und die Steighöhe im Box Test ermittelt. Bild 11 zeigt den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes des SVB P1 und den Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen. Durch die größere Mischungsmenge und durch die ständige Bewegung in der Fahrmischertrommel zeigte der SVB P1 nach 30 min einen etwas günstigeren zeitlichen Verlauf des Fließverhaltens. Bild 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der  $t_{500}$ -Zeit als Kenngröße für die dynamische Viskosität sowie der Mischungszusammensetzung. Auch hier reiht sich der Praxisbeton somit in das Verhalten der Laborbetone ein.



**Bild 11:** Zeitlicher Verlauf des Setzfließmaßes des SVB P1 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen  
**Figure 11:** Behaviour of the slump flow of the SCC P1 with time and comparison with the corresponding laboratory concretes

## 4.2 Testing the fresh concrete properties of a SCC produced in a ready-mixed concrete plant

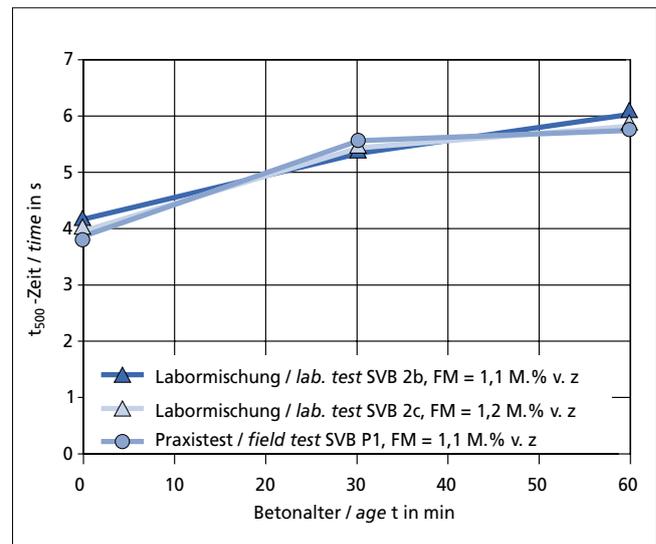
A self compacting concrete SCC P1 with a composition corresponding to SCC 2b was produced in a ready-mixed concrete plant and its fresh and hardened concrete properties were examined in order to check the results from the laboratory. Particular attention had to be paid to the fact that the aggregates had inherent moisture levels of 1 wt.% to 5 wt.%, depending on the fraction. On the one hand this made accurate water addition more difficult, but on the other hand it meant that as a rule these aggregates were saturated with water so that there was no water loss by absorption. The following procedure was chosen for producing the SCC. To avoid adding more water than was necessary to the concrete about 10 l less water were added per  $\text{m}^3$  concrete to take account of the inherent moisture content. The initial consistency of the SCC without plasticizer was then adjusted visually by further water addition. 90 % of the scheduled quantity of plasticizer was then added and the concrete was properly mixed. The flowability and the viscosity of the SCC were checked by the slump flow and associated  $t_{500}$  time, if necessary brought to the planned value for the initial slump flow by further addition of plasticizer, and then placed in a truck mixer. In each case the batch size was  $1.5 \text{ m}^3$ . The slump flow with associated  $t_{500}$  time, the funnel discharge time and the height of rise in the box test were then determined after 30 min and 60 min. Figure 11 shows the behaviour with time of the slump flow of SCC P1 and the comparison with the corresponding laboratory concretes. Due to the larger quantity of mix and the continuous movement in the truck mixer drum the SCC P1 showed somewhat more favourable flow behaviour with time after 30 min. Figure 12 shows the behaviour with time of the  $t_{500}$  time (the parameter for dynamic viscosity) for the mix compositions. Here again the concrete produced under practical conditions matches the behaviour of the laboratory concretes.

## 4.3 Hardened concrete properties

All the concretes examined had the required hardened concrete properties. The compressive strength was  $48 \pm 3 \text{ N/mm}^2$ , the tensile splitting strength was  $3.8 \pm 0.2 \text{ N/mm}^2$ , the modulus of elasticity was approximately  $28\,000 \text{ N/mm}^2$ , the shrinkage after 90 d was  $0.40 \pm 0.03 \text{ mm/m}$ , and the depth of carbonation after 90 d was  $9 \pm 2 \text{ mm}$ .

## 5 Summary

The aim of the investigations was to examine the influence of fluctuations in the composition of self compacting concretes on



**Bild 12:** Zeitlicher Verlauf der  $t_{500}$ -Zeit des SVB P1 und Vergleich mit den entsprechenden Laborbetonen  
**Figure 12:** Behaviour with time of the  $t_{500}$  time of SCC P1 and comparison with the corresponding laboratory concretes

### 4.3 Festbetonergebnisse

Alle untersuchten Betone besaßen anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften: Die Druckfestigkeit betrug  $48 \pm 3 \text{ N/mm}^2$ , die Spaltzugfestigkeit lag bei  $3,8 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ , der E-Modul betrug rd.  $28\,000 \text{ N/mm}^2$ , das Schwindmaß nach 90 d betrug  $0,40 \pm 0,03 \text{ mm/m}$  und die Carbonatisierungstiefe nach 90 d lag bei  $9 \pm 2 \text{ mm}$ .

### 5 Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss von Schwankungen in der Zusammensetzung von selbstverdichtenden Transportbetonen auf die Verarbeitbarkeitseigenschaften zu ermitteln und eventuell notwendige Korrekturmaßnahmen bei Verlust der erforderlichen Eigenschaften zu entwickeln.

Gegenstand der Untersuchung war ein selbstverdichtender Transportbeton, der die Anforderungen an Innenraumbeton nach DIN 1045-2 erfüllt (äquivalenter Wasserzementwert rd. 0,65) und damit in seiner Zusammensetzung repräsentativ für einen großen Produktionsanteil in Transportbetonwerken ist. Die hier vorgestellten Ergebnisse beschränken sich auf Betone ohne Stabilisierer mit einem Mehlkorngelb von  $550 \text{ kg/m}^3$  (Mehlkornotyp), einem Wassergehalt von  $175 \text{ l/m}^3$  und einem Leimvolumen von etwa 36 Vol.-% sowie einem Wasserfeststoffwert des Leims von etwa 0,32. Die selbstverdichtenden Verarbeitungseigenschaften wurden durch Prüfungen des Setzfließmaßes mit und ohne Blockierung, der relativen Trichtergeschwindigkeit und der Steighöhe im Box Test an Laborbetonen ermittelt sowie an einem unter Praxisbedingungen im Transportbetonwerk hergestellten Praxisbeton überprüft. Als Zement wurde ein CEM III/A 32,5 nach DIN EN 197-1 und als Betonzusatzstoff eine Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 eingesetzt. Der Einfluss unterschiedlicher Fließmittel auf den zeitlichen Verlauf des Setzfließmaßes wurde anhand einer Standardbetonzusammensetzung überprüft. Daraus erwies sich ein Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylatether als besonders wirksam. Deshalb kam in den Hauptversuchen nur dieses Fließmittel zum Einsatz. Als Variation der Zusammensetzung wurde gegenüber der in Voruntersuchungen festgelegten Betonrezeptur die Zugabewassermenge um  $\pm 7 \text{ l/m}^3$  variiert. Als Maßnahme zur Korrektur nicht mehr ausreichend verarbeitbarer Betone wurde eine Fließmittelnachdosierung von bis zu 0,2 M.-% untersucht. Alle untersuchten Betone besaßen anforderungsgemäße Festbetoneigenschaften.

Die Veränderungen der Verarbeitbarkeitseigenschaften selbstverdichtender Betone wurden in Abhängigkeit vom Setzfließmaß und von der relativen Trichtergeschwindigkeit dargestellt. In einer solchen Darstellung kann ein Bereich abgegrenzt werden, innerhalb dessen erfahrungsgemäß ausreichend gute Verarbeitbarkeitseigenschaften, d.h. eine ausreichende Fließfähigkeit, Entlüftung und Mischungsstabilität, selbstverdichtender Betone gegeben sind. Korrekturmaßnahmen für das Fließverhalten lassen sich hier gezielt einleiten und beurteilen.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Sollzusammensetzung selbstverdichtender Betone muss durch Erstprüfungen auf der Basis der zum Einsatz kommenden mehlfinen Stoffe und Gesteinskörnungen ermittelt werden.
- Als ausreichend verarbeitungsfähig erweisen sich erfahrungsgemäß Betone mit einem Setzfließmaß zwischen 60 cm und 75 cm und einer relativen Trichtergeschwindigkeit zwischen  $0,45 \text{ s}^{-1}$  und  $1,0 \text{ s}^{-1}$ .
- Im Hinblick auf die Istzusammensetzung sind besonders die Auswirkungen von Schwankungen im Gesamtwassergehalt auf das Setzfließmaß zu berücksichtigen. Durch Erstversuche sind die vertretbaren Schwankungsbreiten zu ermitteln.
- Abweichungen im Zugabewassergehalt von  $\pm 7 \text{ l/m}^3$  veränderten in diesen Versuchen bereits die Fließfähigkeit und die Mischungsstabilität merklich.
- Etwas erhöhte Setzfließmaße bzw. relative Trichtergeschwindigkeiten nach dem Mischen verringern sich bei den hier untersuchten Betonen infolge des Anstehens bereits innerhalb kurzer Zeiten.
- Bei nicht mehr ausreichenden Setzfließmaßen und Trichtergeschwindigkeiten konnten durch eine Nachdosierung des

the workability properties and to develop any corrective measures which may be necessary if the requisite properties are lost.

The subject of the investigation was a self compacting ready-mixed concrete which fulfilled the requirements for interior concrete complying with DIN 1045-2 (equivalent water/cement ratio approximately 0.65) and therefore had a composition which was representative of a large proportion of the production in ready-mixed concrete plants. The results given here are confined to concretes without stabilizers with a powder content of  $550 \text{ kg/m}^3$  ("powder type") and a water content of  $175 \text{ l/m}^3$ , a paste volume of about 36 vol.-% and a water/solids ratio of the paste of about 0.32. The self compacting workability properties were determined by testing the slump flow with and without J-ring, the relative funnel speed and the height of rise in the box test using laboratory concretes, and were also checked on a commercial concrete produced under practical conditions in a ready-mixed transport plant. The cement used was a CEM III/A 32,5 cement complying with DIN EN 197-1; a coal fly ash complying with DIN EN 450 was used as a concrete addition. The influence of different plasticizers on the behaviour of the slump flow with time was checked with the aid of a standard concrete composition. This showed that one plasticizer based on polycarboxylate ether was particularly effective. This was therefore the only plasticizer used in the main tests. To vary the composition the quantity of mixing water was varied by  $\pm 7 \text{ l/m}^3$  for the concrete mix formulation established in the preliminary trials. An additional dosage of plasticizer of up to 0.2 % by mass, relative to the cement content, was investigated as means of correcting concretes which no longer had adequate workability. All the concretes investigated exhibited solid concrete properties which complied with the requirements.

The changes in the workability properties of self compacting concretes were plotted as a function of the slump flow and of the relative funnel speed. In such a representation it is possible to delimit a range within which experience shows that the self compacting concretes have sufficiently good workability properties, i.e. adequate flowability, de-aeration and mix stability. Corrective measures of flowability can be well directed introduced and assessed.

The results can be summarized as follows:

- The target composition of self compacting concretes must be determined by preliminary tests based on the powder materials and aggregates which are to be used.
- Experience shows that concretes with a slump flow between 60 cm and 75 cm and a relative funnel speed between  $0.45 \text{ s}^{-1}$  and  $1.0 \text{ s}^{-1}$  have adequate workability.
- The effects of fluctuations in the total water content on the slump flow must be taken into account when considering the actual composition. The admissible ranges of fluctuation must be determined by preliminary trials.
- In these trials deviations in the mixing water content of only  $\pm 7 \text{ l/m}^3$  caused appreciable changes in the flowability and mix stability.
- With the concretes investigated here the somewhat increased levels of slump flow and relative funnel speeds after mixing were reduced after only short periods as a result of the stiffening.
- If the slump flow and funnel speed were no longer sufficient then adequate workability properties could be re-established even after quite long transport and storage times by an additional dosage of plasticizer.
- The effects of the interactions between powder and plasticizer on the slump flow should be checked by corresponding preliminary trials on standard concrete in order to maintain an adequate period of optimum self compacting properties.

These test results emphasize the importance of carefully planned preliminary trials and of initial and check tests during the production and placement of SCC used as ready-mixed concrete. The influence of temperature and of other concrete compositions is currently being examined.

---

Fließmittels ausreichende Verarbeitungseigenschaften selbst nach längeren Transport- bzw. Lagerzeiten wieder eingestellt werden.

- Um während eines ausreichenden Zeitraums optimale selbstverdichtende Eigenschaften aufrechtzuerhalten, sind die Einflüsse der Wechselwirkungen zwischen Mehlkorn und Fließmittel auf das Fließmaß durch entsprechende Vorversuche an Standardbeton zu überprüfen.

Diese Untersuchungsergebnisse unterstreichen die Bedeutung von sorgfältig geplanten Vorversuchen sowie Erst- und Kontrollprüfungen bei Herstellung und Verarbeitung von SVB als Transportbeton. Der Einfluss der Temperatur und weitere Betonzusammensetzungen werden in laufenden Arbeiten untersucht.

### Literatur / Literature

- [1] Grube, H.; Rickert, J.: Selbstverdichtender Beton – ein weiterer Entwicklungsschritt des 5-Stoff-Systems Beton, *beton* 49 (1999), H. 4, S. 239–244
- [2] Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen, *Chemie-Ing.-Techn.* 45, 1973, No. 6, S. 396–401
- [3] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel, *Beton* 45 (1995), H. 11, S. 802–808 und H. 12, S. 876–881
- [4] <http://www.schleibinger.com>
- [5] Okamura, H.; Ozawa, K.: Mix Design For Self-Compacting Concrete, *Concrete Library of JSCE* No. 25, Juni 1995
- [6] Takada, K.; Pelova G.I.; Walraven, J.C.: Influence of Mixing Efficiency on the Mixture Proportion of General Purpose Self-Compacting Concrete, *International Symposium on High Performance Concrete and Reactive Powder Concrete*, 16–20 August 1998, Sherbrooke, Canada
- [7] DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton: Ergänzungen zu DIN 1045/09.88, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.), Berlin 2001
- [8] DIN EN 450: Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung, Deutsche Fassung EN 450: 1994, Ausgabe 1995-01
- [9] DIN EN 206-1: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [10] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton, Spannbeton; Beton-Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- [11] DIN EN 480: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren, Teil 8 – Bestimmung des Feststoffgehalts, Deutsche Fassung EN 480-8: 1996, Ausgabe 1997-02