

Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton

Assessment of the fresh concrete properties of self compacting concrete

Übersicht

Selbstverdichtender Beton (SVB) zeichnet sich durch seine besondere Verarbeitbarkeit aus. Es muss ein Optimum zwischen Fließfähigkeit, Selbstentlüftung und Homogenität bzw. Stabilität gefunden werden. Der Begriff Selbstverdichtung beschreibt eine Frischbetoneigenschaft, die auf vielfältige Weise mit unterschiedlichen Betonausgangsstoffen und Zusammensetzungen erreicht werden kann. Die Art der Verwendung bestimmt die benötigte Verarbeitbarkeit und den Verarbeitbarkeitszeitraum. Daher fällt es schwer, allgemeingültige Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften von SVB im Rahmen von technischen Regelwerken zu formulieren oder sie in bestimmte Kategorien oder Verarbeitbarkeitsklassen einzuordnen, wie es bei den üblichen Betonen nach Norm der Fall ist.

Gerade bei der Verwendung von SVB kommt es darauf an, dass der Beton zum Einbaupunkt alle benötigten Frischbetoneigenschaften aufweist. Dabei bereitet die Beurteilung der Sedimentation die größten Probleme, da sie – von der totalen, augenscheinlichen Sedimentation abgesehen – in der Regel erst erkannt wird, wenn das Bauteil bereits betoniert wurde. Bislang gibt es kein geeignetes Prüfverfahren, mit dem die Stabilität des Betons vorausgesagt oder als Schnelltest unmittelbar vor dem Einbau bestimmt werden kann.

Es wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem sich die für Selbstverdichtung benötigte Verarbeitbarkeit einschließlich Selbstentlüftung und Sedimentationsstabilität eines SVB beurteilen lässt. Damit können sowohl Übergaben auf der Baustelle geregelt als auch eventuell notwendige Korrekturmaßnahmen bei Verlust der entsprechenden Verarbeitbarkeit zielgerecht eingeleitet werden.

1 Einleitung

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein Beton, der entmischungsfrei unter dem Einfluss der Schwerkraft nahezu bis zum Niveausgleich fließt, dabei entlüftet und die Bewehrungsräume sowie die Schalung vollständig ausfüllt [1]. Ein SVB wird durch Eignungsprüfungen stufenweise aufgebaut, siehe u.a. [2, 3]. Zunächst erfolgt die Optimierung des Leims, anschließend die des Mörtels und zum Schluss die des Betons. Die benötigten Wasser- und Fließmittelgehalte werden in Leim- und Mörtelversuchen ermittelt. Als Zugabewasser ist mindestens der Wassergehalt vorzusehen, der erforderlich ist, um die Oberflächen der Feststoffpartikel zu benetzen und die Hohlräume des Mehlkornhaufwerks zu füllen. Ab diesem Wassergehalt sind die Suspensionseigenschaften durch Wasser und Fließmittel steuerbar. Die endgültige Optimierung erfolgt abschließend in Betonversuchen.

Der Begriff Selbstverdichtung beschreibt eine Frischbetoneigenschaft, die auf vielfältige Weise mit unterschiedlichen Betonausgangsstoffen und Zusammensetzungen erreicht werden kann. Die jeweilige Anwendung des Betons (Art und Form des Bauteils, Verwendung im Fertigteilwerk oder als Transportbeton, Expositi-

Abstract

Self compacting concrete (SCC) is distinguished by its special workability. An optimum must be found between flowability, self-deaeration and homogeneity or stability. The term “self compacting” describes a property of fresh concrete which can be achieved in a variety of ways with different concrete constituent materials and compositions. The nature of the application determines the requisite workability and workability period. It is therefore difficult to formulate generally valid specifications for the fresh concrete properties of SCC in the context of technical regulations or to classify them in specific categories or workability classes, as is usually the case with normal concretes.

When SCC is used it is important that the concrete has all the requisite fresh concrete properties at the time of placement. Assessment of the sedimentation causes the greatest problem because – apart from obvious total sedimentation – it can normally be recognized only when the component has already been concreted. So far there has been no suitable test method which can predict the stability of the concrete or can be used as a rapid test to determine the stability immediately before placement.

A method is proposed which can be used to assess the workability, including self-deaeration and sedimentation stability, needed for self compaction of a SCC. This makes it possible to regulate deliveries to the construction site as well as to initiate any specific correction measures which may be necessary if the appropriate workability is lacking.

1 Introduction

Self compacting concrete (SCC) is a concrete that flows to a virtually uniform level under the influence of gravity without segregation, during which it deaerates and completely fills the formwork and the spaces between the reinforcement [1]. A SCC is built up in stages using suitability tests (see [2, 3] among others). The paste is optimized first, then the mortar and finally the concrete. The requisite levels of water and superplasticizer are established in the paste and mortar tests. The water content needed to wet the surfaces of the solid particles and fill the voids in the particulate powder material represents the minimum quantity of mixing water that has to be provided. Above this water content the properties of the suspension can be controlled by water and superplasticizer. The final optimization is then carried out in concrete tests.

The term “self compacting” describes a property of fresh concrete that can be achieved in a variety of ways with different concrete constituent materials and compositions. The particular application of the concrete (nature and shape of the component, use in precast element plant or as ready-mixed concrete, exposure class) determines the minimum cement content, the paste volume, the

tionsklassen) bestimmt den Mindestzementgehalt, das Leimvolumen, den notwendigen Verarbeitbarkeitszeitraum und die Zusammensetzung der Sieblinie.

Die Art der mehlfinen Stoffe Zement und Zusatzstoff und ihr Volumenverhältnis beeinflussen den optimalen Wassergehalt des SVB und die Empfindlichkeit der Frischbetoneigenschaften gegenüber Schwankungen im Wassergehalt. Ist das Mehlkornhaufwerk nicht gut abgestimmt und zu hohlraumreich, weist der daraus hergestellte SVB eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Wassergehalt auf: Unterhalb des optimalen Wassergehalts ist die Verarbeitbarkeit unzureichend, während geringfügig höhere Wassergehalte nicht durch das Mehlkorn gebunden werden können und es somit zu Absetzerscheinungen kommt. Darüber hinaus bestimmt die gewählte Mehlkornkombination das Fließverhalten des Betons. Es kann von „klebrig-zäh“ bis „wässrig“ reichen.

Das Füll- und Nivelliervermögen eines SVB ist immer auch von der jeweiligen Schalungsgeometrie und dem Verhältnis Schalungsoberfläche zu füllendem Volumen abhängig. Dies begründet auch das unterschiedliche Verhalten verschiedener SVB in Bezug auf den Schalungsdruck. Je nach Fließgrenze und Viskosität (s. Abschnitt 3.1) kann der Schalungsdruck vom vollen hydrostatischen Druck, der in der Regel anzusetzen ist, abweichen.

Das Zusammenwirken der mehlfinen Stoffe und des Zusatzmittels bestimmt die Verarbeitbarkeitsdauer. Sie wird stark von der Reaktivität des Zements, der Lösungszusammensetzung nach Wasserzugabe sowie der Temperatur beeinflusst. Gerade bei der Verwendung von SVB als Transportbeton spielt die Verarbeitbarkeitsdauer eine herausragende Rolle.

Die Sieblinie der Gesteinskörnung muss an die Erfordernisse der Einbausituation angepasst werden. Gering bewehrte Betonbauteile können mit einem leimarmen, grobkornreicheren SVB problemlos betoniert werden. Höher bewehrte Bauwerke hingegen bedürfen eines leimreicheren SVB mit optimierter Sieblinie, um das Blockieren durch grobe Gesteinskörnungen zu vermeiden.

Diese Beispiele verdeutlichen die enorme Vielfalt in der Zusammensetzung selbstverdichtender Betone und ihr unterschiedliches rheologisches Verhalten. Gerade im Hinblick auf eine allgemeingültige Richtlinie zur Anwendung, Herstellung und Verarbeitung von SVB ist diesem Umstand Rechnung zu tragen. Daher bedarf es eines Konzepts zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit von selbstverdichtenden Betonen, um sicherzustellen, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und ein homogenes Gefüge aufweist.

2 Analogie Fließbeton

Die Einführung der Frischbetoneigenschaft „Selbstverdichtung“ ist in etwa mit der Einführung der Konsistenzklasse des Fließbetons Anfang der 70er Jahre vergleichbar. Ebenso wie heute mit der Markteinführung von Fließmitteln auf der Wirkstoffbasis von Polycarboxylatether ermöglichten in den 70er Jahren neue Wirkstoffe für verflüssigende Zusatzmittel wie Naphthalinsulfonat und Melaminsulfonat die Entwicklung des Fließbetons. Es wurde eine ähnliche Diskussion über den Nutzen des Fließbetons geführt. Die Verbesserung der Betonqualität und die Rationalisierung des Einbauvorgangs einerseits und Bedenken gegen den Einsatz der neuen Zusatzmittel und Gefahren durch Sedimentation, Verarbeitbarkeitsverlust sowie ungewisse, nachteilige Auswirkungen auf die Festbetonkennwerte durch den „erhöhten“ Mehlkornanteil von 350 kg/m^3 bis 420 kg/m^3 bestimmten die Diskussion. Es galt, die gleichen Aufgabenstellungen wie das Zusammenspiel zwischen Verarbeitbarkeit und Stabilität sowie die Grenzen der Herstellungsgenauigkeit zu lösen. Um die bei hoher Fließfähigkeit unverzichtbare Mischungsstabilität sicherzustellen, wurde die Ausgangskonsistenz des Betons ohne Fließmittel auf Werte zwischen 30 cm und 40 cm (Ende K2/Anfang K3) begrenzt [4, 5]. Durch diese Forderung wurde ein gutes Zusammenhaltevermögen des durch mit Fließmittel auf fließfähige Konsistenz verflüssigten Betons erreicht. Somit konnte auf eine direkte Prüfung der Mischungsstabilität verzichtet werden.

Des Weiteren forderte die Richtlinie zur Herstellung und Verarbeitung von Fließbeton umfangreiche Qualitätssicherungsmaßnahmen wie umfassende Eignungsprüfungen, die Zugabe des

required workability period and the composition of the grading curve.

The nature of the powder materials, namely cement and addition, and their volumetric ratio influence the optimum water content of the SCC and the sensitivity of the fresh concrete properties to fluctuations in water content. If the particulate powder material is not well coordinated and contains too many voids then the SCC produced from it will be highly sensitive to fluctuations in the water content – below the optimum water content the workability will be inadequate, while if the water content is slightly higher it cannot be bound by the powder and settlement phenomena occurs. The chosen powder combination also determines the flow behaviour of the concrete. It can range from “sticky-viscous” to “watery”.

The filling and levelling ability of a SCC is always also dependent on the particular formwork geometry and the ratio of formwork surface area to volume to be filled. This is also the reason for the differing behaviour of different SCCs with respect to formwork pressure. Depending on the yield value and viscosity (see Section 3.1) the formwork pressure may deviate from the full hydrostatic pressure that normally has to be specified.

The interaction of the powder materials and the admixture determines the workability period. It is heavily influenced by the reactivity of the cement, the composition of the solution after the addition of water and the temperature. The duration of workability plays a particularly prominent role when SCC is used as ready-mixed concrete.

The aggregate grading curve has to be adjusted to suit the placement requirements. Concrete components with little reinforcement can be concreted without problem using a low-paste SCC with a high proportion of coarse aggregate. On the other hand, structures with more reinforcement require a SCC with a higher proportion of paste and an optimized grading curve in order to avoid blocking by coarse aggregate.

These examples illustrate the enormous diversity in the composition of self compacting concretes and their different rheological characteristics, and must be taken into account when considering guidelines that can be applied universally to the application, production and placement of SCC. A strategy is therefore needed for assessing the workability of self compacting concretes to ensure that the concrete has adequate flow and deaeration properties and a homogeneous microstructure.

2 Analogy with superplasticized concrete

The introduction of the “self compacting” fresh concrete property is in some ways comparable with the introduction of the consistency class of superplasticized concrete at the start of the 70s. New active ingredients for plasticizing admixtures such as naphthalene sulfonate and melamine sulfonate made it possible to develop super plasticized concrete in the 70s in the same way as the current introduction to the market of superplasticizers based on polycarboxylate ether as the active ingredient. There was a similar discussion over the benefits of superplasticized concrete. The discussion centred on the improvement in concrete quality and rationalization of the placement process as against misgivings about the use of new admixtures and the risk of sedimentation and loss of workability as well as uncertain detrimental effects on the hardened concrete parameters due to the “increased” proportion of the powder from 350 kg/m^3 to 420 kg/m^3 . The same problems, such as the interaction between workability and stability and the limits of production accuracy, had to be solved. The initial consistency of the concrete without superplasticizer was limited to values between 30 cm and 40 cm (end of K2/start of K3) to ensure the mix stability that is essential at high flowability [4, 5]. This requirement meant that concrete plasticized to a free-flowing consistency with superplasticizer achieved a good cohesive ability so that direct testing of the mix stability was no longer required.

Furthermore, the guideline on the production and placement of superplasticized concrete required extensive quality assurance measures such as comprehensive suitability testing, addition of the superplasticizer at the truck mixer only by trained personnel, and control of the effects of time and temperature on the flow behaviour of the concrete [5].

Fließmittels nur durch geschultes Personal am Fahrnischer sowie die Beherrschung der Einflüsse von Zeit und Temperatur auf das Fließverhalten des Betons [5].

Fließbeton gehört heute zum Stand der Technik. Gerade durch die Einführung von SVB erlebt der Fließbeton eine Wiederentdeckung wenn nicht sogar seine wirkliche Entdeckung, was an der zunehmenden Verbreitung der „Leichtverdichtenden Betone“ (LVB) der Konsistenzklasse F6 gesehen werden kann.

Insgesamt ist der Kenntnisstand über SVB heute höher als der über Fließbeton zum damaligen Zeitpunkt der Richtlinieneinführung. Die mit SVB in zahlreichen Zulassungsversuchen gewonnenen Erfahrungen sowie die große Anzahl von Forschungsarbeiten aus dem In- und Ausland sind in den DAfStb-Richtlinienentwurf [6] eingeflossen und werden für hohe Qualitätssicherungsstandards sorgen. So zeigte sich, dass SVB im Gegensatz zu Normalbeton nach heutigem Kenntnisstand keine abweichenden Festbetoneigenschaften aufweist und die Ermittlung der 28-Tage-Druckfestigkeit zur Charakterisierung in der Regel ausreicht. Das Hauptaugenmerk wird auf der Sicherstellung der geforderten Frischbetoneigenschaften liegen. Denn nur wenn der Beton selbstentlüftend und mischungsstabil ist, können die geforderten Festbetoneigenschaften erreicht werden.

3 Ermittlung der Frischbetoneigenschaften von SVB

3.1 Rheologisches Modell

SVB entspricht im frischen Zustand in guter Näherung rheologisch einem Bingham-Körper mit den Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität (Bild 1). Das Bingham'sche Fließgesetz beschreibt das Verformungsverhalten einer Suspension unter Scherspannung. Es setzt sich aus einem konstanten Faktor, der Fließgrenze τ_f , und einem variablen Anteil, der vom Verhältnis der aufgetragenen Scherspannung τ und der Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ abhängig ist und durch die Viskosität η beschrieben wird, zusammen. Die Fließgrenze gibt die Energie an, die von außen aufgebracht werden muss, damit die Suspension zu fließen beginnt. Die Viskosität beschreibt den Widerstand gegen Verformung während des Fließens.

Um die rheologischen Eigenschaften von SVB vollständig zu beschreiben, werden daher zwei Größen – Fließgrenze und Viskosität – benötigt. Für Leime und Mörtel können sie in so genannten 2-Punkt-Versuchen wie z.B. in Rotationsrheometern bestimmt werden. Sie werden deshalb 2-Punkt-Versuch genannt, da während eines Versuchs durch Variation der Belastungsgeschwindigkeit beide Kennwerte ermittelt werden können. Aufgrund des weiten Bereichs der Korndurchmesser vom μm - bis in den cm -Bereich gelingt es für Beton jedoch nicht, die benötigten physikalischen Randbedingungen für einen 2-Punkt-Versuch einzuhalten (Erzeugung einer laminaren Strömung sowie Unterdrückung der Ausbildung von Scherfugen und des Einflusses der Wandreibung). So ist es bei SVB zur genaueren Beschreibung der Verarbeitbarkeit unerlässlich, zwei 1-Punkt-Prüfverfahren heranzuziehen, die jeweils nur einen Kennwert liefern und teils mehr die Fließgrenze und teils eher die Viskosität bewerten. Darüber hinaus müssen Einbaubarkeit (blockierungsfreies Fließen) und Stabilität (homogene Grob-kornverteilung) begutachtet werden.

3.2 Anforderungen

Wie aus der Definition des selbstverdichtenden Betons hervorgeht (s. Abschnitt 1), müssen verschiedene Frischbetoneigenschaften erfüllt werden. Der SVB muss ausreichend fließfähig sein, damit die groben Gesteinskörnungen im Mörtel „schwimmen“ können, aber die Luft weiterhin ausreichend aufsteigen und entweichen kann. Das Sedimentieren der groben Gesteinskörnungen und das Aufsteigen von Feinmörtel, Leim oder Wasser vor dem Erstarren des Betons müssen vermieden werden. Andernfalls entstehen inhomogen zusammengesetzte Bauteile, die in ihrer Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigt sein können. Das Leimvolumen und die Sieblinie müssen so gewählt werden, dass der Beton die Schalung vollständig ausfüllt und nicht vor Bewehrungszwischenräumen blockiert. Um diese Anforderungen an SVB sicherzustellen, wurden geeignete Prüfverfahren entwickelt, mit denen die entsprechenden Anforderungen nachgewie-

Superplasticized concrete is now state of the art. The introduction of SCC has resulted in something of a rediscovery of superplasticized concrete, which can be seen in the increasing spread of “Easily compacted concretes” (ECC) of the F6 consistency class.

As a whole the level of understanding of SCC is higher than that of superplasticized concrete at the time when the guideline was introduced. The experience gained with the numerous approval tests with SCC and the large amount of research work at home and abroad have been incorporated in the draft DAfStb guideline [6] and will ensure high quality assurance standards. It is apparent, for example, that according to current understanding the hardened concrete properties of SCC do not differ from those of normal concrete, and as a rule can be characterized adequately by determining the 28-day compressive strength. Attention is centred on securing the required fresh concrete properties, as the required hardened concrete properties can only be achieved if the concrete deaerates automatically and has a stable mix.

3 Determination of the fresh concrete properties of SCC

3.1 Rheological model

In the fresh state SCC corresponds rheologically to good approximation to a Bingham solid with the parameters of yield value and viscosity (Figure 1). The Bingham flow law describes the deformation behaviour of a suspension under shear stress. It is composed of a constant factor, the yield value τ_f , and a variable component that depends on the ratio of the applied shear stress τ to the rate of load application $\dot{\gamma}$ and is described by the viscosity η . The yield value gives the energy that must be applied externally to make the suspension start to flow. The viscosity describes the resistance to deformation during the flow.

Two variables – yield value and viscosity – are therefore required for a complete description of the rheological properties of SCC. For pastes and mortars they can be determined in so-called 2-point tests, such as in rotation rheometers. They are called 2-point tests because both parameters can be determined during one test by varying the rate of load application. However, because of the wide range of particle diameters in concrete from the μm to the cm range it is not possible to maintain the physical constraints required for a 2-point test (generation of laminar flow as well as suppression of the formation of shear faults and the influence of wall friction). To obtain a more accurate description of the workability of SCC it is therefore essential to use two 1-point test methods that each supply only one parameter, one of which tends to evaluate the yield value and the other the viscosity. The placeability (blocking-free flow) and stability (homogeneous coarse particle distribution) also have to be examined.

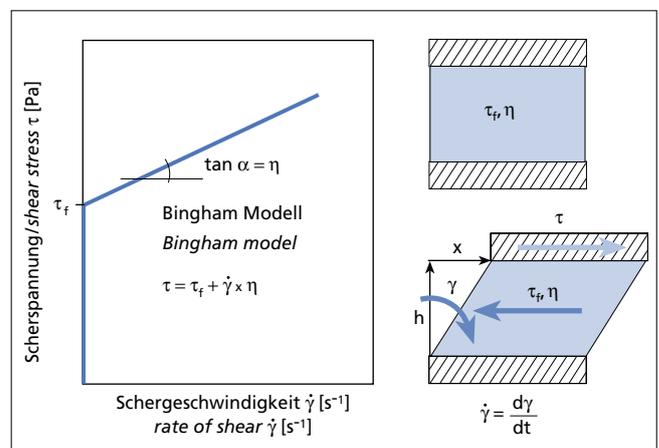


Bild 1: Bingham Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Suspensionen mit den Kenngrößen Fließgrenze τ_f und Viskosität η

Figure 1: Bingham model for describing the deformation behaviour of suspensions with the parameters of yield value τ_f and viscosity η

sen werden können. Die benötigten Prüfverfahren werden im Folgenden noch einmal vorgestellt.

3.3 Prüfverfahren für SVB

3.3.1 Setzfließmaß

Das Setzfließmaß s_m ist eine Kombination aus Slump- und Ausbreitmaß. Zur Ermittlung des Setzfließmaßes wird die Hohlkegelstumpfform (Setztrichter) aus der Slumpprüfung nach DIN EN 12350-2 umgedreht auf eine Setzfließplatte mit einer Kantenlänge von mindestens 800 mm x 800 mm aufgesetzt und mit SVB befüllt. Der Vorteil des umgedrehten Setztrichters liegt darin, dass der Konus gegen Auftrieb gesichert ist und daher die Prüfung von einem Laboranten durchgeführt werden kann. Nach Ziehen des Setztrichters wird analog zum Ausbreitmaß der mittlere Durchmesser des sich nach Beendigung des Fließvorgangs ausgebreiteten Betons bestimmt. Während der Prüfung darf keine Verdichtungsenergie aufgebracht werden, sodass der SVB nur unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt. Bild 2 zeigt die Setzfließmaßprüfung. Die Prüfung des Setzfließmaßes wird Bestandteil der in Vorbereitung befindlichen DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ sein und ist dort im Anhang M beschrieben [6].

Das Setzfließmaß wird in erster Linie durch die Fließgrenze des Betons beeinflusst. Je niedriger die Fließgrenze ist, desto größer ist der sich ausbildende Ausbreitkuchen. Die Fließgrenze wiederum hängt hauptsächlich vom Grad der Agglomeration der feinen Bestandteile im Beton ab, die am wirkungsvollsten mit Fließmittel reduziert werden kann [7]. Daher ist das Setzfließmaß in erster Linie geeignet, die Fließgrenze des SVB und den optimalen Fließmittelgehalt zu beurteilen.

Mit diesem Versuch können ferner das Zusammenhaltevermögen und die Entmischungsneigung des Betons durch Begutachtung des gebildeten Ausbreitkuchens (homogen, zerfallen, Leimrand, Absetzungserscheinungen über die Höhe des Ausbreitkuchens usw.) bewertet werden.

3.3.2 Trichterauslaufzeit

Die Trichterauslaufzeit T dient als Messgröße zur Beschreibung der Viskosität eines SVB. Sie ist dem japanischen SVB-Entwurfskonzept entnommen [2, 3]. Zur Durchführung wird ein Trichter ($b_{\text{oben}} = 515 \text{ mm}$, $b_{\text{unten}} = 65 \text{ mm}$, $h_{\text{ges}} = 600 \text{ mm}$, Neigung = 45°), wie er in Bild 3 dargestellt ist, benötigt. Der SVB wird bei geschlossener Auslaufklappe bis zum Rand in den Trichter gefüllt. Danach wird der Verschluss geöffnet und die Zeit in Sekunden gemessen, die der SVB benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen. Das Verfahren zur Ermittlung der Trichterauslaufzeit wird ebenfalls im Anhang M der in Vorbereitung befindlichen DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ beschrieben [6].

Die Viskosität einer Suspension ist hauptsächlich vom Wasser-Feststoff-Verhältnis und von der Gesamtsieblinie abhängig. Somit fließen wasserreichere SVB schneller aus dem Trichter aus und weisen eine niedrigere Viskosität auf als wasserärmere. In der japanischen Literatur wird die Trichterauslaufzeit in eine relative Trichtergeschwindigkeit R nach der Formel $R = 10/\text{Trichterauslaufzeit}$ umgerechnet. Dies führt in manchen Fällen zu einer besseren graphischen Darstellbarkeit der Ergebnisse.

3.3.3 Fließzeit

Die Ermittlung der Fließzeit t_{500} stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Viskosität eines SVB zu beurteilen. Sie wird während der Setzfließmaßprüfung (s. Abschnitt 3.3.1) gemessen. Die Fließzeit ist die Zeit, die der SVB benötigt, um nach dem Ziehen des Setztrichters auf einen Durchmesser von 500 mm zu fließen. Der Durchmesser von 500 mm ist auf der Setzfließplatte entsprechend zu markieren (s. Bild 2). Je länger die Fließzeit ist, desto höher ist die Viskosität des SVB.

3.3.4 Blockiering-Prüfung

Die Blockiering-Prüfung dient der Ermittlung der Blockierneigung eines SVB. Sie erfolgt analog zur Setzfließmaßprüfung (s. Abschnitt 3.3.1). Zusätzlich wird jedoch der Blockiering (Bild 4) benötigt. Alle Blockierversuche, wie auch der Box-Test oder der

3.2 Requirements

It is clear from the definition of self compacting concrete (see Section 1) that the fresh concrete has to fulfil various properties. The SCC must be adequately free-flowing so that the coarse aggregate particles can “float” in the mortar but the air can still rise and escape adequately. Sedimentation of the coarse aggregate particles and upward movement of fine mortar, paste or water before the concrete sets must be avoided. Otherwise, components will be produced with inhomogeneous compositions that can adversely affect their durability and fitness for use. The paste volume and grading curve must be chosen so that the concrete completely fills the formwork and is not held back in front of the gaps between the reinforcement. Suitable test methods by which the corresponding requirements can be verified were developed to ensure that the SCC meets these requirements. The requisite test methods are described again below.

3.3 Test methods for SCC

3.3.1 Slump flow

The slump flow s_m is a combination of slump and flow diameter. To determine the slump flow the hollow truncated cone (slump cone) from the slump test defined in DIN EN 12350-2 is placed inverted on a slump flow plate with an edge length of at least 800 mm x 800 mm and is filled with SCC. The advantage of the inverted slump cone is that the cone is protected from upthrust and the test can therefore be carried out by a laboratory assistant. When the slump cone has been withdrawn the average diameter of the spread concrete is determined after completion of the flow process in the same way as for the flow spread. No compaction energy must be applied during the test so that the SCC flows only under the influence of gravity. Figure 2 shows the slump flow test. Testing the slump flow will form part of the DAfStb “Self compacting concrete” guideline that is in preparation, and is described there in Appendix M [6].

The slump flow is influenced primarily by the yield value of the concrete. The lower the yield value the larger is the extended circle of concrete formed. The yield value depends in turn mainly on the degree of agglomeration of the fine constituents in the concrete, which can be reduced most effectively with superplasticizers [7]. The slump flow is therefore primarily suitable for assessing the yield value of the SCC and the optimum superplasticizer content.

The cohesive ability and the tendency to segregation of the concrete can also be evaluated with this test by examining the extended circle of concrete formed (homogeneous, disintegrated, paste at the perimeter, occurrence of settling over the depth of the extended circle, etc.).

3.3.2 V-funnel flow time

The V-funnel flow time T serves as a measured variable for describing the viscosity of a SCC. It is taken from the Japanese SCC design concept [2, 3]. A funnel ($b_{\text{top}} = 515 \text{ mm}$, $b_{\text{bottom}} = 65 \text{ mm}$, $h_{\text{total}} = 600 \text{ mm}$, slope = 45°) as shown in Figure 3 is required for carrying out the test. With the outlet flap closed the funnel is filled to the top with SCC. The flap is then opened and the time in seconds taken for the SCC to flow from the funnel is measured. The method of determining the V-funnel flow time is also described in Appendix M of the DAfStb “Self compacting concrete” guideline currently in preparation [6].

The viscosity of a suspension is dependent mainly on the water/solids ratio and the overall grading curve. This means that a SCC with a higher water content flows faster out of the funnel and has a lower viscosity than SCC with a lower water content. In the Japanese literature the V-funnel flow time is converted into a relative funnel speed R using the formula $R = 10/\text{V-funnel flow time}$. In some cases this can assist the graphic display of the results.

3.3.3 Flow time

Determination of the flow time t_{500} represents another possible way of assessing the viscosity of a SCC. It is measured during the slump flow test (see Section 3.3.1). The flow time is the time required by the SCC to flow to a diameter of 500 mm after the slump cone has been withdrawn. The diameter of 500 mm therefore has to be

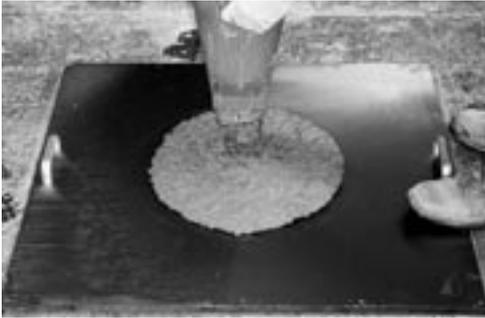


Bild 2: Durchführung der Setzfließmaßprüfung mit umgedrehtem Setztrichter auf Setzfließplatte (900 mm x 900 mm) mit 500 mm Markierung für die Bestimmung der Fließzeit

Figure 2: Carrying out the slump flow test with inverted slump cone on the slump flow plate (900 mm x 900 mm) with 500 mm marking for determining the flow time



Bild 3: Auslauftrichter für SVB zur Bestimmung der Trichterauslaufzeit T

Figure 3: Flow funnel for SCC for determining the V-funnel flow time T

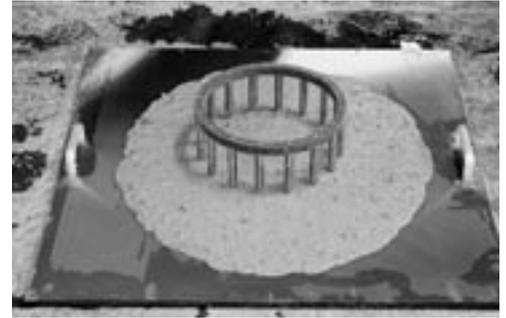


Bild 4: Setzfließmaßprüfung mit Blockkiering ($\varnothing_{\text{Ring}} = 300$ mm, Stäbe: 16 mit $\varnothing 18$ mm, $h = 125$ mm), $sm_b = 700$ mm

Figure 4: Slump flow test with J-ring ($\varnothing_{\text{ring}} = 300$ mm, 16 rods - $\varnothing 18$ mm, $h = 125$ mm), $sm_b = 700$ mm

L-Kasten-Versuch (s. Abschnitt 3.3.5), simulieren Einbaustandbedingungen, bei denen der Beton Fließhindernisse überwinden muss. Der Grad der Blockierneigung wird in der Regel durch das Messen eines Niveauunterschieds bestimmt.

Der Vorteil des Blockieringversuchs liegt in der Verbindung der Setzfließmaßprüfung und der Einbausimulation. Der Blockiering wird durch Markierungen auf der Setzfließplatte zentriert. Dann wird der Setztrichter, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, in der Mitte der Platte aufgesetzt, mit SVB befüllt und hochgezogen. Danach breitet sich der SVB auf der Setzfließplatte aus und muss dabei die Stäbe des Blockierings umfließen. Ein SVB blockiert nicht, wenn die Differenz der Setzfließmaße aus Setzfließmaßprüfung sm und aus Blockieringprüfung $sm_b < 50$ mm ist. Das Verfahren ist ebenfalls im Anhang M der in Vorbereitung befindlichen DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ [6] aufgeführt.

3.3.5 Sonstige Verfahren zur Überprüfung der Einbaubarkeit von SVB

Der Box-Test (Bild 5) [2, 3] sowie der L-Kasten-Versuch [8] sind Verfahren, bei denen der SVB auf seine Einbaubarkeit überprüft wird. Bei beiden Verfahren wird eine abgeschlossene, vertikale Kammer mit dem zu prüfenden Beton befüllt, wodurch sich eine hydrostatische Druckhöhe ergibt. Nach Öffnen eines Schiebers muss sich der Beton durch Fließhindernisse hindurch vertikal (Box-Test) oder horizontal (L-Box) ausspiegeln. Die Abweichung vom Nivellement bestimmt die Blockierneigung. Darüber hinaus gibt es weitere Verfahren, die von Prüfanstalten, Betonherstellern oder Baufirmen entwickelt wurden.

3.3.6 Tauchstabverfahren

Das im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), Düsseldorf, entwickelte Tauchstabverfahren ist ein Prüfverfahren zur Ermittlung der Sedimentationsneigung und dient der Beurteilung, ob der zu verarbeitende SVB stabil ist, d.h. ob die groben Gesteinskörnungen bis zum Ansteifen des Zement-Feinstoff-Leims bzw. Mörtels gleichmäßig verteilt in ihrer Lage gehalten werden können.

Die Sedimentationsneigung lässt sich an einer Frischbetonprobe zeitabhängig ermitteln. Ist der SVB stabil, sinkt ein Tauchstab nahezu konstant zu jedem Zeitpunkt bis zum Erstarren jeweils bis auf den Grund der Frischbetonsäule ab. Handelt es sich um einen instabilen SVB, dringt ein Tauchstab in Abhängigkeit von der sedimentierten Schichthöhe der groben Gesteinskörnungen mit zunehmender Zeit nur noch begrenzt ein. Dabei ist zu beachten, dass sich durch den Tauchstab ein „Eintauchkanal“ bilden kann. Beim Absinken des Tauchstabs werden die Gesteinskörnungen zu den Seiten hin verdrängt, während beim Herausziehen vorzugsweise der Leim dem Tauchstab folgt. Um Folgeprüfungen in „Eintauchkanälen“ zu vermeiden, müssen jeweils andere Stellen der Betonprobe untersucht werden. Ebenso ist darauf zu achten, dass der

marked on the slump flow plate (see Figure 2). The longer the flow time, the higher is the viscosity of the SCC.

3.3.4 J-ring test

The J-ring test is used to determine the flow behaviour of a SCC in the face of obstructions. It is carried out in the same way as the slump flow test (see Section 3.3.1), but the J-ring (Figure 4) is also required. All blocking tests, including the box test or the L-box test (see Section 3.3.5), simulate placement conditions in which the concrete has to overcome obstacles to flow. The extent of the tendency to blocking is determined as a rule by measuring a difference in level.

The advantage of the J-ring trial lies in the link with the slump flow test and with the placement simulation. The J-ring is centred on the slump flow plate by markings. The slump cone, as described in Section 3.3.1, is placed in the centre of the plate, filled with SCC and lifted up. The SCC then spreads out on the slump flow plate and has to flow around the bars of the J-ring. A SCC is not considered to exhibit blocking behaviour if the difference between the slump flow from the slump flow test sm and from the J-ring test sm_b is less than 50 mm. The method is also listed in Appendix M of the DAfStb guideline “Self compacting concrete” currently in preparation [6].

3.3.5 Other methods for testing the placeability of SCC

The box test (Figure 5) [2, 3] and the L-box test [8] are tests for assessing the placeability of SCC. In both methods a closed vertical chamber is filled with the concrete to be tested so that a hydrostatic pressure head is produced. After a slide is opened the concrete has to level out through vertical (box test) or horizontal (L-box) flow obstacles. The difference in levels determines the tendency to blocking. There are also other methods that have been developed by test establishments, concrete producers or construction firms.

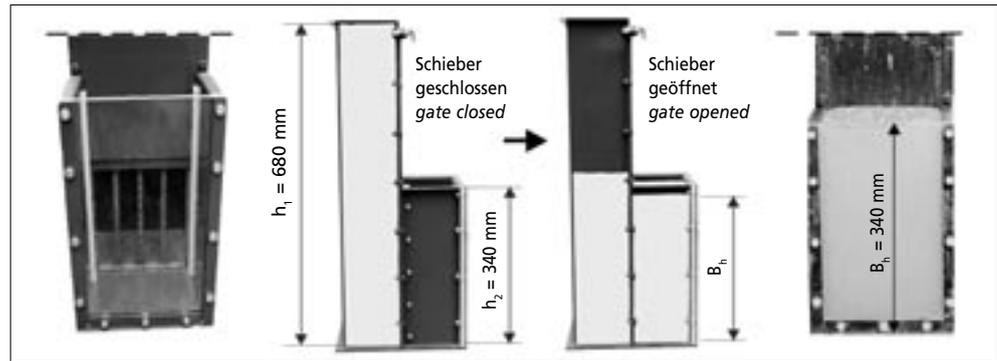
3.3.6 Plunger method

The plunger method developed at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) in Düsseldorf is a method for determining the tendency to sedimentation and is used for assessing whether the SCC is stable, i.e. whether the coarse aggregate particles can be held uniformly distributed in their positions until the cement fines paste or mortar stiffens.

The tendency to sedimentation is determined on a fresh concrete sample as a function of time. If the SCC is stable then the plunger sinks down to the bottom of the column of fresh concrete virtually every time until setting occurs. If an unstable SCC is involved then the plunger penetrates to only a limited extent with increasing time depending on the height of the sedimented layer of coarse aggregate particles. It must be borne in mind that the plunger can form an “immersion channel”. As the plunger sinks the ag-

Bild 5: Box-Test zur Überprüfung der Einbaubarkeit und des Blockierverhaltens von SVB – der SVB muss sich nach dem Öffnen des Schiebers durch Fließhindernis (linkes Bild) nahezu ausspiegeln ($B_h \geq 320$ mm, rechtes Bild)

Figure 5: Box test for checking the placeability and blocking behaviour of SCC – after the slide has been opened the SCC must flow through the flow obstacles (left-hand diagram) to a virtually constant level ($B_h \geq 320$ mm, right-hand diagram)



Tauchstab nur unter seinem Eigengewicht eindringt. Daher ist ein Führungsrohr auf einer verdrehbaren Brücke zu verwenden.

Die Sedimentationshöhe h_s wird definiert als Differenz der Probekörperhöhe h_0 und der Eintauchstrecke h_T des Tauchstabs und wird in mm angegeben. Das Gerät zur Ermittlung der Sedimentationshöhe besteht aus einem Tauchstab aus Stahl ($l = 750$ mm, $\varnothing = 14$ mm, Masse ~ 900 g, Eintauchende gerundet, Markierung in Höhe Oberkante Führungsrohr), einem Führungsrohr und aus einer Führrohrhalterung (Bild 6). Zusätzlich wird eine Zylinderform mit einem Innendurchmesser von 150 mm und einer Höhe von 600 mm benötigt.

Der SVB wird in die Zylinderform eingefüllt und bis zum Erstarren in geeigneten Zeitintervallen mit dem Tauchstab überprüft. Der Tauchstab wird durch das Führungsrohr bis auf die Betonoberfläche abgesetzt. Anschließend wird der Tauchstab losgelassen, sodass er nur unter seinem Eigengewicht in die Frischbetonprobe eindringt. Es wird die Eintauchstrecke h_T des Tauchstabs anhand der Markierung gemessen und die Sedimentationshöhe h_s errechnet. Zusätzlich wird der Zeitpunkt der Prüfung in min nach Füllen des Zylinders angegeben. Danach wird das Führungsrohr abgezogen und der Tauchstab langsam durch ein Tuch o.ä. herausgezogen. Stab und Führungsrohr sind nach jeder Prüfung zu reinigen und abzutrocknen. Wenn die drei Öffnungen der Führrohrhalterung beprobt sind, ist diese für jeweils weitere zwei Prüfungen geeignet zu verdrehen.

Es wird die Sedimentationshöhe in mm über der Zeit in Minuten aufgetragen. Ist der SVB stabil, sinkt der Tauchstab nahezu konstant jeweils bis auf den Grund der Frischbetonsäule ab ($h_s \sim 0$)

und steigt erst infolge des Erstarrens innerhalb kurzer Zeit auf den Höchstwert ($h_s \sim 600$ mm) an. Handelt es sich um einen instabilen SVB, dringt der Tauchstab in Abhängigkeit von der sedimentierten Schichthöhe der groben Gesteinskörnungen nach kurzer Zeit nur noch begrenzt ein und verhartet dann längere Zeit auf der Sedimentationshöhe (Bild 7). Das Verfahren ist geeignet, zusätzliche Informationen über das Absetzverhalten (zeitlicher Verlauf, kontinuierliches oder plötzliches Absetzen usw.) zu gewinnen. Einen festen Grenzwert liefert dieses Verfahren jedoch nicht.

3.3.7 Auswaschversuch

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Stabilität von SVB am Frischbeton ist der Auswaschversuch. Dabei wird der SVB in einen 450 bis 500 mm hohen Zylinder mit ei-

gregate particles are displaced to the sides but when it is withdrawn the paste tends to follow the plunger. To avoid subsequent tests in "immersion channels" the test must be carried out each time at a different position in the concrete sample. Care must also be taken that the plunger penetrates only under its own weight. A guide tube on a rotatable bridge should therefore be used.

The sedimentation height h_s is defined as the difference between the test piece height h_0 and the immersion depth h_T of the plunger, and is specified in mm. The equipment for determining the sedimentation height consists of a steel plunger ($l = 750$ mm, dia. = 14 mm, mass ~ 900 g, immersion end rounded, with a mark level with top edge of the guide tube), a guide tube and a guide tube support (Figure 6). A hollow cylinder with an internal diameter of 150 mm and a height of 600 mm is also required.

The SCC is filled into the cylinder and tested with the plunger at suitable time intervals until setting occurs. The plunger is lowered through the guide tube to the surface of the concrete. The plunger is then released so that it penetrates into the fresh concrete sample only under its own weight. The depth of immersion h_T of the plunger is measured with the aid of the mark, and the sedimentation height h_s is calculated. The time of the test in minutes after the cylinder was filled is also specified. The guide tube is then removed and the plunger is withdrawn slowly through a cloth or similar material. The rod and guide tube should be cleaned and dried after each test. When tests have been carried out through the three openings in the guide tube mount the mount can be rotated appropriately to allow two further tests in each position.

The sedimentation height in mm is plotted against the time in minutes. If the SCC is stable the plunger sinks to the bottom of the fresh concrete column ($h_s \sim 0$) virtually every time; it then rises to the maximum value ($h_s \sim 600$ mm) within a short period because setting has occurred. If the SCC is unstable the plunger penetrates to only a limited extent after a short time depending on the height of the sedimented layer of coarse aggregate particles and then remains at the sedimentation level for a fairly long time (Figure 7). The procedure is suitable for obtaining further information about the settling behaviour (behaviour with time, continuous or sudden settling, etc.) but does not provide a fixed limit value.

3.3.7 Wash test

Another method for determining the stability of SCC on the fresh concrete is the wash test. The SCC is filled into a 450 to 500 mm high cylinder with a diameter of 150 mm that has slots to take separating sheets that divided the cylinder into three equal sections. The dividing plates are inserted after the concrete sample has set. The resulting three batches of SCC are then washed separately over an 8 mm sieve (for 16 mm maximum aggregate size), and the sieve residues are weighed after drying. The difference between the percentages of coarse particles in the individual segments from the percentage of coarse particles in the overall sample is calculated. A SCC counts as stable to sedimentation if the difference of the measured masses of the 8/16 aggregate fractions of the three individual batches from the target mass is not more than 15 wt.% [9]. The wash test is included in the DAFStb self compacting concrete guideline currently in preparation and is described there in Appendix N [6].



Bild 6: Tauchstabversuch: Tauchstab ist vollständig bis zur Markierung durch Führungsrohr in mit SVB gefülltem Probekörper (Zylinder $\varnothing = 150$ mm, $h = 600$ mm) abgesunken

Figure 6: Plunger test: the plunger has sunk right to the mark through the guide tube into the test piece (cylinder; diameter = 150 mm, $h = 600$ mm) filled with SCC

nem Durchmesser von 150 mm eingefüllt, der an den Drittelpunkten Schlitze zur Aufnahme von Trennblechen aufweist. Nach dem Erstarren der Betonprobe werden die Trennbleche eingefügt. Die so entstandenen drei SVB-Chargen werden dann getrennt über einem 8-mm-Sieb (für Größtkorn 16 mm) ausgewaschen und der Siebrückstand nach dem Trocknen gewogen. Danach wird die Abweichung des prozentualen Grobkornanteils im einzelnen Segment vom prozentualen Grobkornanteil in der Gesamtprobe berechnet. Ein SVB gilt als sedimentationsstabil, wenn die Abweichung von den ermittelten Massen der Gesteinskörnungsfraction 8/16 der drei Einzelchargen zur Sollmasse nicht mehr als 15 M.-% beträgt [9]. Der Auswaschversuch ist in der in Vorbereitung befindlichen DAfStb-Richtlinie SVB enthalten und wird dort im Anhang N beschrieben [6].

3.3.8 Begutachtung der Stabilität am Festbeton

Die augenscheinliche Begutachtung der Stabilität von SVB an einer Festbetonprobe ist die einfachste und sicherste Art, da man den erhärteten Zustand selbst prüft. Eine Möglichkeit ist ebenfalls im Anhang N der in Vorbereitung befindlichen DAfStb-Richtlinie SVB aufgeführt [6]. Dort wird ein 500 mm hoher Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm mit SVB befüllt und nach dem Erhärten längs gesägt. Anhand des Schnittbilds kann bestimmt werden, ob der SVB stabil war oder in welchem Rahmen die grobe Gesteinskörnung abgesunken ist. Das Spalten von zylindrischen Probekörpern ($h = 300 \text{ mm}$, $\varnothing = 150 \text{ mm}$) zur Ermittlung der Schwindverformung oder des E-Moduls ist ebenfalls geeignet, über das Bruchbild die Sedimentationsstabilität von SVB augenscheinlich zu beurteilen.

4 Verarbeitbarkeitsbereich von SVB – „Fensterlösung“

4.1 Allgemeines

Wie in der Einleitung beschrieben, ist Selbstverdichtung eine Frischbetoneigenschaft, die auf vielfältige Weise mit unterschiedlichen Materialien und Zusammensetzungen erreicht werden kann. Feste Grenzwerte für Frischbetoneigenschaften und Verarbeitbarkeitsklassen in einer Richtlinie können nur einen Teil der selbstverdichtenden Betone erfassen und sind wenig zweckmäßig. Um für alle Formen des selbstverdichtenden Betons einheitliche Regeln und Bewertungsmaßstäbe zu setzen, eignet sich die im Folgenden beschriebene „Fensterlösung“.

4.2 Ermittlung des Verarbeitbarkeitsbereichs

Bei der Rezeptentwicklung und in der Erstprüfung ermittelt der Betonhersteller in Frisch- und Festbetonprüfungen den optimalen Verarbeitbarkeitsbereich für seinen SVB. Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich ist dadurch gekennzeichnet, dass der Beton unter den vorgesehenen Verarbeitungsbedingungen ausreichend fließt, entlüftet und sedimentationsstabil ist. Dazu werden zusammen mit den Frischbetonprüfungen Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit bzw. Fließzeit Probekörper hergestellt, um das Gefüge des Betons sowie die sich ausbildende Oberfläche im erhärteten Endzustand zu begutachten.

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit des SVB wird in einem Diagramm die Trichterauslaufzeit bzw. die Fließzeit als Maß für die Viskosität in Abhängigkeit vom Setzfließmaß als Kriterium für die Fließgrenze aufgetragen. Darin kann unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Gefügeuntersuchungen an den Festbetonprobekörpern (Bruchbild und Oberfläche) des entsprechenden SVB ein Bereich eingegrenzt werden, in dem eine ausreichend fließfähige und entmischungsarme Verarbeitbarkeit vorliegt – blockierungsfreies Fließen vorausgesetzt. Das blockierungsfreie Fließen wird bei der Erstprüfung separat mit Box-Test, L-Box oder Blockierung gemäß den zu erwartenden Anforderungen ermittelt. Außerhalb dieses Bereichs liegen Betonzusammensetzungen, die zur Sedimentation neigen bzw. nicht ausreichend entlüften (Luft-einschluss) oder nicht ausreichend fließen (Stagnation). Bild 8 zeigt den Verarbeitbarkeitsbereich für einen SVB (Zusammensetzung s. Tafel 3, SVB 4).

Durch die festgelegten unteren und oberen Grenzwerte für Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit bzw. Fließzeit werden der Zielwert und die zulässigen Abweichungen vom Zielwert bestimmt.

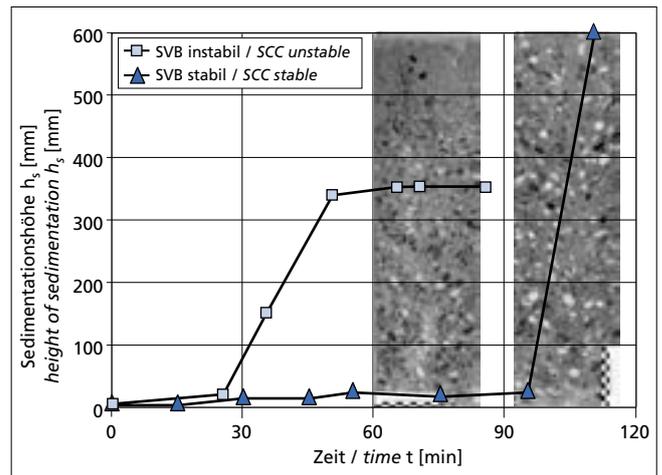


Bild 7: Auswertung des Tauchstabversuchs für instabilen und stabilen SVB

Figure 7: The plunger test for evaluating unstable and stable SCCs

3.3.8 Examining the stability in the hardened concrete

Visual examination of the stability of SCC on a hardened concrete sample is the simplest and most reliable method, as a direct check can be made in the hardened state. One possible method is also listed in Appendix N of the DAfStb self compacting concrete guideline currently in preparation [6]. A 500 mm high cylinder with a diameter of 150 mm is filled with SCC and after this has hardened it is sawn lengthways. By examining the section it is possible to determine whether the SCC was stable or to what extent the coarse aggregate has sunk. Splitting cylindrical test pieces ($h = 300 \text{ mm}$, $\text{dia.} = 150 \text{ mm}$) for determining the shrinkage deformation or the elastic modulus is also a suitable way of visual assessment of the sedimentation stability of SCC from the fracture patterns.

4 Workability range of SCCs – “Window solution”

4.1 General

Self compaction is, as described in the introduction, a property of fresh concrete that can be achieved in a variety of ways with different materials and compositions. Fixed limits for fresh concrete properties and workability classes in a guideline can only cover one aspect of self compacting concretes and are not very appropriate. The “window solution” described below is suitable for setting consistent rules and evaluation standards for all forms of self compacting concrete.

4.2 Determination of the workability range

During the development of the mix formulation and in the initial testing the concrete producers determine the optimum workability ranges for their SCCs in fresh and hardened concrete tests. The optimum workability range is characterized by the fact that under the intended placement conditions the concrete has adequate flow and deaeration properties and is stable to sedimentation. Test pieces are therefore made in order to examine the microstructure of the concrete and the surface formed in the final hardened state in addition to the fresh concrete tests of slump flow and flow time or V-funnel flow time.

A diagram of the flow time or V-funnel flow time, as a measure of the viscosity, is plotted against the slump flow, as a criterion of the yield value, in order to assess the workability of the SCC. By taking the results of the microstructural examinations carried out on the hardened concrete samples (fracture patterns and surface) of the corresponding SCC it is possible to mark off a range in the diagram in which there is adequate flowability with low-segregation workability – assuming blocking-free flow. The blocking-free flow is determined separately in the initial tests with the box test, L-box test or J-ring in accordance with the anticipated requirements. Outside this range lie concrete compositions that have a tendency to sedimentation or do not deaerate adequately (air inclusions) or

Zu beachten ist, dass einige SVB ein unterschiedliches Frischbetonverhalten in verschiedenen Temperaturbereichen zeigen. Daher muss in der Erstprüfung der zum Einsatz kommende Temperaturbereich nachgewiesen werden. Gegebenenfalls müssen in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedliche SVB-Verarbeitungsfenster festgelegt werden.

Der Hersteller gibt die Zielwerte und zulässigen Abweichungen für das Setzfließmaß und die Trichterauslaufzeit bzw. die Fließzeit für Selbstverdichtung an. Die Grenzen des Fensters müssen in der laufenden Produktion durch die Eigenüberwachung kontinuierlich überprüft werden, da sie sich durch Schwankungen der Ausgangsstoffe verändern können. Befindet sich mindestens ein Wert z.B. bei der Übergabe vor dem Einbau nicht im Fenster, wird der Beton verworfen oder es müssen geeignete Korrekturmaßnahmen (z.B. Fließmittelnachdosierung) eingeleitet werden, um den SVB wieder in den Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen.

4.3 Beispiele

4.3.1 Allgemeines

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ), Düsseldorf, wird zurzeit im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB), Kamp-Lintfort, die zielsichere Herstellung von SVB als Transportbeton unter Verwendung der in den Betonwerken vorhandenen Betonausgangsstoffe und Anlagen untersucht. Über erste Ergebnisse wurde bereits in [10] berichtet.

Nachfolgend wird die Ermittlung des Verarbeitbarkeitsfensters detailliert anhand eines ausgewählten SVBs (SVB 1) aus diesen Untersuchungen dargestellt. Es handelt sich um einen selbstverdichtenden Beton des Mehlkorntyps. Als Zement wurde ein Hochofenzement CEM III/A 32,5 R und als Zusatzstoff Flugasche verwendet. In diesen Untersuchungen wurden sowohl die Wassergehalte um den optimalen Wassergehalt als auch die Fließmitteldosierungen variiert, um die Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften zu ermitteln. Zusätzlich wurde das Festbetongefüge der Probekörper begutachtet, die zu entsprechenden Prüfzeitpunkten hergestellt wurden. Es wurden ebenfalls die zeitliche Entwicklung der Verarbeitbarkeit und die Nachdosierung von Fließmittel bei nicht mehr ausreichend verarbeitbaren selbstverdichtenden Betonen untersucht. Das Leimvolumen und die Abstufungen der Gesteinskörnungen waren so gewählt, dass in allen Fällen blockierungsfreies Fließen in der Box-Test-Prüfung sichergestellt war.

In Bild 9 sind gemäß dem Verfahren nach Abschnitt 4.2 („Fensterlösung“) die Wertepaare aus Setzfließmaß und zugehöriger Trichterauslaufzeit sowie der ermittelte Verarbeitbarkeitsbereich für SVB 1 dargestellt. Darin sind einige charakteristische Werte-

do not flow adequately (stagnation). Figure 8 shows the workability range for one SCC (for composition see Table 3, SCC 4).

The target values and the permissible deviations from the target values are determined by the upper and lower limits that have been established for the slump flow and for the flow time or V-funnel flow time.

It should be borne in mind that some SCCs exhibit different fresh concrete behaviour patterns in different temperature ranges. The temperature range that will be used must therefore be verified in the initial testing. If necessary, different SCC workability windows must be stipulated depending on the temperature.

The producer specifies the target values and permissible deviations for the slump flow and flow time or V-funnel flow time for self compaction. The limits of the window must be checked continuously by internal monitoring while production is in progress as they can vary due to fluctuations in the constituent materials. If one or more values, e.g. on the delivery before placement, does not lie within the window the concrete is rejected or suitable correction measures (e.g. subsequent addition of superplasticizer) must be initiated to bring the SCC back into the workability range.

4.3 Examples

4.3.1 General

Dependable production of SCC in the form of ready-mixed concrete using the concrete constituents and equipment available in concrete plants is currently being investigated at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry), Düsseldorf, at the request of the FTB (Ready-mixed Concrete Research Association), Kamp-Lintfort. The initial results have already been reported in [10].

A detailed description is given below of the establishment of the workability window based on a SCC (SCC 1) selected from these investigations. This is a self compacting concrete of the powder type. The cement used was a CEM III/A 32,5 R blastfurnace cement with fly ash as an addition. The water contents were varied around the optimum water content and the addition levels of superplasticizer were also varied in these investigations to determine the effects on the fresh concrete properties. The hardened concrete microstructures of the test pieces that had been produced at appropriate test times were also examined. The change with time of the workability and the subsequent addition of superplasticizer for self compacting concretes that were no longer sufficiently workable were also investigated. The paste volume and the gradation of the aggregate particles were chosen so as to ensure blocking-free flow in the box test in all cases.

The pairs of values of slump flow and associated V-funnel flow time as well as the workability range established for SCC 1 are

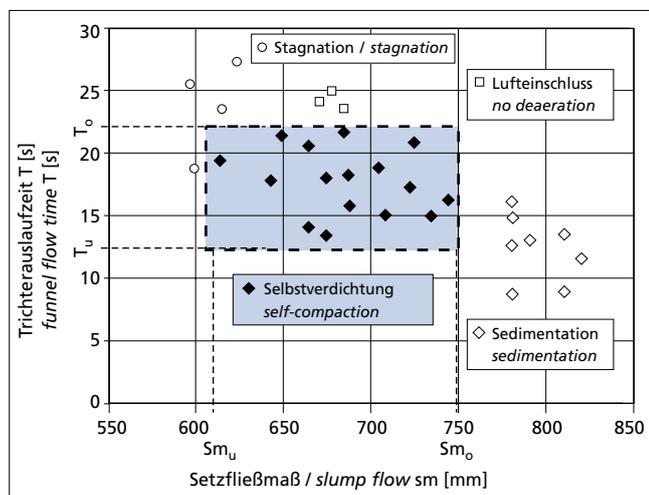


Bild 8: Rheologische Eigenschaften eines SVB in Abhängigkeit von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit mit Verarbeitbarkeitsfenster für Selbstverdichtung

Figure 8: Rheological properties of a SCC as a function of the slump flow and V-funnel flow time with workability window for self compaction

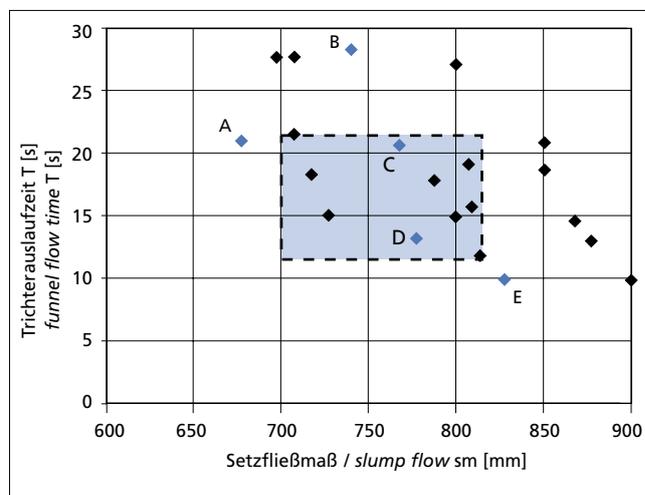


Bild 9: Herleitung des Verarbeitbarkeitsfensters für SVB 1 mit charakteristischen rheologischen Eigenschaften (A bis E) in Abhängigkeit von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit

Figure 9: Derivation of the workability window for SCC 1 with characteristic rheological properties (A to E) as a function of slump flow and V-funnel flow time

Tafel 1: Kennwerte der Frischbetonproben sowie Bruchbilder und Mantelflächen von SVB 1-A bis SVB 1-E
Table 1: Parameters of the fresh concrete samples as well as fracture patterns and outer surfaces of SCC 1-A to SCC 1-E

Nr.		SVB/SCC 1-A	SVB/SCC 1-B	SVB/SCC 1-C	SVB/SCC 1-D	SVB/SCC 1-E
CEM III/A 32,5 R	kg/m ³	240	240	240	240	240
Flugasche / fly ash	kg/m ³	310	310	310	310	310
Wasser / water	kg/m ³	168	168	168	175	175
Fließmittel / plasticizer (PCE)	M.-% v.z	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8
Nachdosierung / subsequent addition	M.-% v.z	-	-	0,2	0,2	0,2
Zeitpunkt der Nachdosierung nach Mischungsende time of subsequent addition after end of mixing	min	-	-	60	30	30
Herstellzeitpunkt der Probekörper nach Mischungsende time of placement after end of mixing	min	30	0	90	60	35
Setzfließmaß / slump flow sm	mm	680	740	770	780	830
Trichterauslaufzeit / V-funnel flow time T	s	22	29	22	14	10

SVB/SCC 1-A	SVB/SCC 1-B	SVB/SCC 1-C	SVB/SCC 1-D	SVB/SCC 1-E

paare stellvertretend aus dieser Serie hervorgehoben und mit den Buchstaben A bis E gekennzeichnet.

In Tafel 1 sind Angaben zur Zusammensetzung, Zeitpunkt und Menge von Fließmittelnachdosierungen, die Frischbetonkennwerte Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit sowie der Zeitpunkt der Herstellung der Probekörper nach Mischungsende aufgeführt. Sie zeigt weiterhin die Bilder der zugehörigen Probekörper für die Betone SVB 1-A bis SVB 1-E. Darauf sind sowohl die Bruchbilder zur Begutachtung des inneren Gefüges und die Oberflächen zur Überprüfung der Selbstentlüftung der Zylinder zu erkennen. Zudem sind die jeweiligen Setzfließmaße und Trichterauslaufzeiten angegeben.

4.3.2 Darstellung der Ergebnisse

Aus den Bildern und Messwerten in Tafel 1 ergeben sich folgende Ergebnisse: Zum Einbaupunkt besaß SVB 1-A ein Setzfließmaß von 680 mm und eine Trichterauslaufzeit von 22 s. Das Bruchbild zeigt eine homogene Grobkornverteilung. An der Oberfläche des Zylinders sowie im Gefügebild sind jedoch eine große Anzahl von Luftporen zu erkennen. SVB 1-A war stabil, zeigte aber keine ausreichende Selbstentlüftung. Die Fließfähigkeit war zu gering und die Viskosität zu hoch.

SVB 1-B wies zum Einbaupunkt ein Setzfließmaß von 740 mm und eine Trichterauslaufzeit von 29 s auf. Wie auf dem Bild zu sehen ist, zeigt der Probekörper ebenfalls eine gleichmäßige Grobkornverteilung, aber ebenfalls unzulässig große Luftporen im Inneren als auch in der Mantelfläche. Obwohl der Wert des Setzfließmaßes eine ausreichende Fließfähigkeit aufwies, war die Viskosität des Betons für eine ausreichende Selbstentlüftung zu hoch.

Die Zylinder, die mit den Betonen SVB 1-C und SVB 1-D hergestellt wurden, sind ebenfalls in Tafel 1 abgebildet. Beide Probekörper weisen eine gleichmäßige Verteilung der groben Gesteinskörnungen sowie Oberflächen mit einem sehr geringen Anteil an Luftporen auf. Bei annähernd gleichem Setzfließmaß von 770 mm bzw. 780 mm besaß SVB 1-C eine höhere Auslaufzeit von 22 s und SVB 1-D eine niedrigere von 14 s. In beiden Fällen waren jedoch Stabilität und Selbstentlüftung gegeben.

Der Probekörper, der mit SVB 1-E hergestellt wurde, weist eine nahezu porenfreie Oberfläche auf, die auf eine hohe Selbstentlüftung zurückgeführt werden kann. Jedoch zeigt das Bruchbild in der

shown in Figure 9 in accordance with the process described in Section 4.2 ("Window solution"). Some characteristic value pairs have been highlighted in the diagram as representative of this series and are marked with the letters A to E.

Information about the composition, time and quantity of subsequent superplasticizer addition and the fresh concrete parameters of slump flow and V-funnel flow time as well as the time of production of the test pieces after the end of mixing are listed in Table 1. It also shows photographs of the associated test pieces for the concretes SCC 1-A to SCC 1-E. The fracture pattern for examination of the internal microstructure as well as the surface for checking the self-deaeration of the cylinder can be seen. The associated slumped flows and V-funnel flow times are also given.

4.3.2 Representation of the results

The following results were obtained from the photographs and measured values in Table 1. At the time of placement SCC 1-A had a slump flow of 680 mm and a V-funnel flow time of 22 s. The fracture pattern shows a homogeneous coarse particle distribution. However a large number of air voids can be seen on the surface of the cylinder and in the microstructure. SCC 1-A was stable, but did not exhibit adequate self-deaeration. The flowability was too low and the viscosity was too high.

At the time of placement SCC 1-B had a slump flow of 740 mm and a V-funnel flow time of 29 s. As can be seen from the photo-

Tafel 2: SVB 1, Zielwerte und zulässige Abweichungen für den Verarbeitbarkeitsbereich

Table 2: SCC 1, target values and permissible deviations for the workability range

Setzfließmaß sm slump flow sm	Zielwert target value	$sm = (sm_U + sm_O)/2$ = (700 + 820)/2 = 760 mm
	Zulässige Abweichung permissible deviation	$\Delta s = (sm_O - sm_U)/2$ $m = (820 - 700)/2 = 60$ mm
Trichterauslaufzeit T funnel flow time T	Zielwert target value	$T = (T_U + T_O)/2$ = (12 + 22)/2 = 17 s
	Zulässige Abweichung permissible deviation	$\Delta T = (T_O - T_U)/2$ = (22 - 12)/2 = 5 s

oberen Zone ($h \sim 50$ mm) des Zylinders eine Leimanreicherung und nur einzelne grobe Gesteinskörner. Die zugehörigen Werte für das Setzfließmaß von 830 mm und die Trichterauslaufzeit von 10 s kennzeichnen den Beginn des instabilen Bereichs. Aufgrund der hohen Fließfähigkeit und der niedrigen Viskosität kann die Luft fast vollständig entweichen. Die Viskosität des Mörtels ist aber zu gering, um die groben Gesteinskörner während des Fließens und in der Ruheposition zu tragen.

Aus den Untersuchungen konnte der optimale Verarbeitbarkeitsbereich für SVB 1 abgeleitet werden (s. Bild 9). Befinden sich die Werte für das Setzfließmaß zwischen 700 mm und 820 mm und für die Trichterauslaufzeit zwischen 12 s und 22 s, kann von einer ausreichenden Mischungsstabilität und Selbstentlüftung ausgegangen werden. Die Ziel- und Toleranzwerte für das Fenster sind in Tafel 2 aufgeführt.

Dieses Verarbeitbarkeitsfenster gilt im Temperaturbereich von 20 °C. Versuche im Temperaturbereich von ungefähr 30 °C führten zu keiner Veränderung der festgelegten Ziel- und Toleranzwerte. Untersuchungen im Temperaturbereich <10 °C zeigen, dass sich das Fenster geringfügig verkleinert und zu geringeren Setzfließmaßen (700 mm bis 780 mm) hin verschiebt, während die Trichterzeit nahezu unverändert bleibt.

4.3.3 Verarbeitbarkeitsbereiche verschiedener SVB

In Bild 10 sind die Verarbeitbarkeitsbereiche von vier verschiedenen selbstverdichtenden Betonen dargestellt. Sie unterscheiden sich durch die mehlfine Stoffe, die Zusammensetzung und durch Ausgangsstoffe unterschiedlicher Hersteller. In Tafel 3 sind die relevanten Parameter der Betonzusammensetzung aufgeführt. Dieses Bild verdeutlicht die unterschiedlichen Bereiche für optimale selbstverdichtende Eigenschaften verschiedener selbstverdichtender Betone. Zu erkennen ist, dass die Verarbeitbarkeitsbereiche um den von Okamura [2] angegebenen Kennwert für Selbstverdichtung von $sm \sim 700$ mm und $T \sim 15$ s schwanken. Die genaue Lage und die Größe des jeweiligen Verarbeitbarkeitsfensters hängt jedoch stark von den verwendeten Ausgangsstoffen und ihrer Kombination ab. Hervorzuheben sind z.B. die Fenster für SVB 1 und für SVB 4. SVB 1 zeigt, wie in Abschnitt 4.3.2 hergeleitet, optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 700 mm und 820 mm in Kombination mit Trichterauslaufzeiten von 12 s bis 22 s. SVB 4 dagegen, der in Art und Gehalt der mehlfine Stoffe identisch ist, jedoch Ausgangsstoffe anderer Hersteller enthält, zeigt optimale selbstverdichtende Eigenschaften bei Setzfließmaßen zwischen 600 mm und 750 mm sowie Trichterauslaufzeiten von 10 s bis 20 s.

5 Zusammenfassung

Um die selbstverdichtenden Eigenschaften eines SVB zu beurteilen, wurde ein Lösungsansatz entwickelt, die Verarbeitbarkeit in einem Diagramm mit den zwei Kenngrößen Setzfließmaß – als Maß für die Fließgrenze – und Trichterauslaufzeit – als Maß für die Viskosität – darzustellen.

Der optimale Verarbeitbarkeitsbereich für Selbstverdichtung sowie die Grenzen der Verarbeitbarkeit (Stagnation und Sedimentation) sind für den entsprechenden SVB in Frisch- und Festbetonuntersuchungen durch Variation der Wasser- und Fließmittelgehalte zu prüfen und festzulegen. Zur Beurteilung der Mischungsstabilität und der Selbstentlüftung werden die Oberflächen und Bruchbilder von Probekörpern, die mit dem SVB hergestellt wurden, mit den zugehörigen Frischbetonkennwerten verglichen.

Somit lässt sich der Bereich der selbstverdichtenden Eigenschaft durch einen Verarbeitbarkeitsbereich innerhalb des Verarbeitbarkeitsdiagramms kennzeichnen. Liegen z.B. bei der Übergabe des Betons beide Frischbetonkennwerte Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit innerhalb des im Erstversuch geprüften und während der werkseigenen Produktionskontrolle aktualisierten Verarbeitbarkeitsfensters, kann davon ausgegangen werden, dass der Beton ausreichend fließt, entlüftet und mischungsstabil ist. Ferner werden Abweichungen von der Sollzusammensetzung innerhalb des Verarbeitbarkeitsdiagramms erkennbar. Dementsprechend können auch bei nicht ausreichenden Frischbeton-

graphs the test piece had a uniform coarse particle distribution, but also inadmissibly large air voids internally and at the outer surface. Although the value of the slump flow indicated adequate flowability the viscosity of the concrete was too high for adequate self-deaeration.

The cylinders made with concretes SCC 1-C and SCC 1-D are also shown in Table 1. Both samples exhibit uniform distribution of the coarse aggregate particles as well as surfaces with a very low percentage of air voids. With almost identical slump flows of 770 mm and 780 mm respectively SCC 1-C had a higher flow time of 22 s and SCC 1-D a lower one of 14 s. However, stability and self-deaeration were achieved in both cases.

The test piece that was produced with SCC 1-E has a virtually void-free surface that can be attributed to a high degree of self-deaeration. However, the fracture pattern in the upper zone ($h \sim 50$ mm) of this cylinder shows enrichment of paste and only a few coarse aggregate grains. The associated values for the slump flow of 830 mm and for the V-funnel flow time of 10 s are characteristic of the start of the unstable range. Because of the high flowability and low viscosity virtually all the air is able to escape. However, the viscosity of the mortar is too low to support the coarse aggregate grains during the flow and when stationary.

From the investigations it was possible to derive the optimum workability range for SCC 1 (see Figure 9). If the values for the slump flow lie between 700 mm and 820 mm and for the V-funnel flow time lie between 12 s and 22 s then adequate mix stability and self-deaeration can be assumed. The targets and tolerance values for the window are listed in Table 2.

This workability window applies to the temperature range around 20 °C. Tests in the temperature range at about 30 °C did not result in any changes in the stipulated target and tolerance values. Investigations in the temperature range below 10 °C showed that the window is slightly reduced in size and is displaced towards lower slump flows (700 mm to 780 mm) while the V-funnel flow time remains virtually unchanged.

4.3.3 Workability ranges of different SCCs

The workability ranges of four different self-compacting concretes are shown in Figure 10. They differ in the powder materials, and composition as well as in the constituent materials from different producers. The relevant parameters of the concrete compositions are listed in Table 3. This diagram illustrates the different ranges for optimum self compacting properties of different self compacting concretes. It can be seen that the workability ranges fluctuate around the characteristic value for self compaction of $sm \sim 700$ mm and $T \sim 15$ s specified by Okamura [2] for self compaction. However, the precise position and size of the specific workability window depends heavily on the constituent materials used and their combination. Particular prominence should be given, for example, to the windows for SCC 1 and SCC 4. SCC 1 shows, as derived in

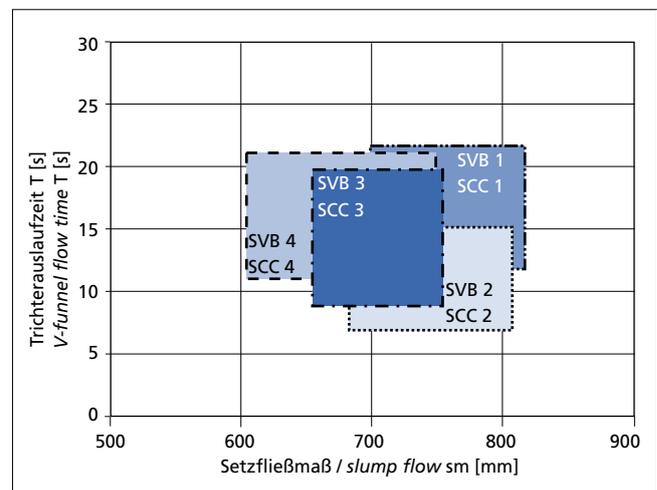


Bild 10: Verarbeitbarkeitsfenster für vier verschiedene SVB
Figure 10: Workability windows for four different SCCs

Tafel 3: Kennwerte der selbstverdichtenden Betone SVB 1 bis SVB 4
Table 3: Parameters of the self compacting concretes SCC 1 to SCC 4

Nr.	SVB 1 SCC 1	SVB 2 SCC 2	SVB 3 SCC 3	SVB 4 SCC 4
Zement / cement	CEM III/A 32,5 R	CEM III/A 32,5 R	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
Zementgehalt cement content in kg/m ³	240	270	285	240
Zusatzstoff concrete addition	Steinkohlen- flugasche 1 coal fly ash 1	Steinkohlen- flugasche 1 coal fly ash 1	Kalksteinmehl limestone meal	Steinkohlen- flugasche 2 coal fly ash 2
Zusatzstoffgehalt concrete addition content in kg/m ³	310	280	265	310
Fließmittel plasticizer (PCE)	PCE 1	PCE 1	PCE 2	PCE 2
Wassergehalt water content in kg/m ³	168	173	177	175

kennwerten von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit geeignete Korrekturmaßnahmen (z.B. Fließmittelnachdosierung) zielgerichtet eingeleitet werden, um den SVB wieder in den vorher festgelegten Verarbeitbarkeitsbereich zu bringen. Die Art der erforderlichen Korrekturmaßnahmen ist in den Eignungsprüfungen festzulegen.

Die Untersuchungen wurden von der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB) und ihren Mitgliedsunternehmen finanziert und begleitet.

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] Okamura, H.; Ozawa, K.: Mix Design For Self-Compacting Concrete, Concrete Library of JSCE No. 25, Juni 1995
- [3] 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
- [4] Bonzel, J.; Siebel, E.: Fließbeton und seine Anwendungsmöglichkeiten. beton 24 (1974), H. 1, S. 20–24 und H. 2, S. 59–63
- [5] Bonzel, J.; Siebel, E.: Erläuterungen zur Richtlinie für Beton mit Fließmitteln und für Fließbeton Fassung Januar 1986, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). Berlin, Schriftenreihe des DAfStb Heft 400, S. 177–185
- [6] DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton: Ergänzungen zu DIN 1045-2: 2001 und DIN 206-1:2001 sowie DIN 1045-3:2001, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.). Berlin (in Vorbereitung)
- [7] Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel. Beton 45 (1995), H. 11, S. 802–808 und H. 12, S. 876–881
- [8] Petersson, Ö.; Billberg, P.: Investigation on Blocking of Self-Compacting Concrete with Different Maximum Aggregate Size and Use of Viscosity Agent instead of Filler, Proceedings of the First International RILEM Symposium Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden 1999, S. 333–344
- [9] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Sedimentationsstabilität von selbstverdichtenden Betonen. beton 53 (2003), H. 1, S. 10–15
- [10] Kordts, S.; Grube, H.: Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von selbstverdichtendem Beton als Transportbeton. beton 52 (2002), H. 4, S. 217–223

Section 4.3.2, optimum self compacting properties at slump flows between 700 mm and 820 mm in combination with V-funnel flow times of 12 s to 22 s. SCC 4, on the other hand, which is identical in the nature and content of the powder materials but contains constituent materials from a different producer, shows optimum self compacting properties at slump flows between 600 mm and 750 mm and V-funnel flow times of 10 s to 20 s.

5 Summary

An approach for assessing the self compacting properties of a SCC has been developed which represents the workability in a diagram using the slump flow parameter as a measure of the yield value and the V-funnel flow time parameter as a measure of the viscosity.

The optimum workability range for self compaction as well as the limits of workability (stagnation and sedimentation) have to be tested and specified for the corresponding SCC in fresh and hardened concrete investigations by varying the levels of water and superplasticizer. The surfaces and fracture patterns of test pieces produced with the SCC are compared with the associated fresh concrete parameters to assess the mix stability and self-deaeration.

This enables the range of the self compacting property to be characterized by a workability range within the workability diagram.

If, for example, when the concrete is delivered the two fresh concrete parameters of slump flow and V-funnel flow time lie within the workability window established in the initial test and updated during internal factory production control it can be assumed that the concrete has adequate flow, deaeration and mix stability properties. What is more, any deviations from the target composition will become recognizable within the workability diagram. This also means that if the fresh concrete parameters of slump flow and V-funnel flow time are not adequate then suitable specific corrective measures (e.g. secondary addition of superplasticizer) can be initiated to bring the SCC back into the previously defined workability range. The nature of the requisite corrective measures must be specified in the compliance tests.

The investigations were financed and attended by the FTB (Ready-mixed Concrete Research Association) and its member companies.

