



Institut für Werkstoffe des Bauwesens  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

# Selbstverdichtender Beton

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Frühjahrstrimester 2018

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Grundlagen	5
3	Anforderungen an die Betonzusammensetzung	8
3.1	Wahl der Ausgangsstoffe	8
3.2	Mischungsentwurf	9
3.2.1	Festlegen des Luftgehalts	9
3.2.2	Volumen der groben Gesteinskörnung festlegen	10
3.2.3	Volumen für die feine Gesteinskörnung (Sand) festlegen	10
3.2.4	Bestimmung von Wasser- und Mehlkorngesamt	11
3.3	Frischbetoneigenschaften	15
3.4	Prüfverfahren für die Frischbetoneigenschaften	16
3.4.1	Prüfung der Fließfähigkeit von selbstverdichtendem Beton	17
3.4.2	Prüfung der Viskosität von selbstverdichtendem Betons	19
3.4.3	Durchgangsfähigkeit (passing ability) von selbstverdichtendem Beton	22
3.4.4	Sedimentationsstabilität (Segregation Resistance) von SVB	24
3.4.5	Luftgehalt und Frischbetonrohichte	25
3.4.6	Nicht genormte Verfahren zur Beurteilung von SVB	26
4	Festbetoneigenschaften [Lit 20]	28
4.1	Herstellung der Probekörper für Festbetonuntersuchungen [Lit 3]	28
4.2	Druckfestigkeit [Lit 20]	28
4.3	Zugfestigkeit [Lit 20]	28
4.4	Elastizitätsmodul [Lit 20]	28
4.5	Verbundfestigkeit [Lit 20]	29
4.6	Schwinden [Lit 20]	29
4.7	Kriechen [Lit 20]	30
4.8	Spannungs-Dehnungs-Linie [Lit 20]	31

5	Herstellung, Transport und Einbau	32
5.1	Mischen und Transportieren	32
5.2	Einbau von SVB [Lit 25]	32
5.3	Schalungsdruck [Lit 24]	33
5.4	Nachbehandlung	33
5.5	Oberflächenqualität	34
6	Selbstverdichtender Leichtbeton	35
7	Literatur	36

# 1 Einleitung

Selbstverdichtende Betone (SVB) (häufig auch self-compacting concrete (SCC)) bzw. Vorläufer von SVB sind schon länger bekannt. Bereits vor mehr als 70 Jahren wurden in den USA sehr fließfähige Betone, so genannte Gussbetone, eingebaut, die selbstverdichtend und selbstnivellierend waren. Ihre hohe Fließfähigkeit ging allerdings auf Kosten der Dauerhaftigkeit, denn sie wurde mit hohen Wassergehalten, d. h. hohen w/z-Werten erkaufte. Qualitativ höher stehend sind die nicht selbstverdichtenden Fließbetone, die in den 1970er-Jahren mit Hochleistungsbetonverflüssigern (high range water reducers (HRWR)) hergestellt wurden. Doch auch diese konnten sich nicht durchsetzen [Lit 13].

Selbstverdichtender Beton, wie wir ihn heute verstehen, wurde in den 1980er Jahren in Japan mit dem Ziel entwickelt, dauerhafte Betonkonstruktionen zu erstellen. Als ein wesentliches Problem auf dem Weg wurde das sorgfältige Verdichten des Betons angesehen. Die hierzu erforderlichen Bauarbeiter wurde immer weniger und im gleichen Maße nahm die Betonqualität ab. Als eine mögliche Abhilfe entstand die Idee des selbstverdichtenden Betons, der nur aufgrund seines Eigengewichts ohne zusätzlichen Energieeintrag in alle Ecken der Schalung fließen und sich selbst bei enger Bewehrung vollständig verdichten sollte. Die grundlegenden Arbeiten gehen zurück auf OKAMURA [Lit 17]. Zunächst wurden diese Betone als „Self-compacting High Performance Concrete“ bzw. „High Performance Concrete“ bezeichnet, ehe sich self-compacting concrete (SCC) durchsetzte.

1990 wurden erste Großprojekte mit SVB in Japan ausgeführt. In Europa wird SVB seit 1996 (Frankreich, Schweden) eingesetzt. In Deutschland wurde der Einsatz von SVB zunächst über Zustimmungen im Einzelfall und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen geregelt. 2003 wurde mit der bauaufsichtlichen Einführung der Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) für Selbstverdichtenden Beton [Lit 3] der Einsatz allgemein möglich. Seit 2008 liegt mit [Lit 10] eine Ergänzung der europäischen Betonnorm [Lit 8] vor, die allerdings noch nicht bauaufsichtlich eingeführt ist.

Als Argumente für die Verwendung von SVB werden verschiedene Vorteile ins Feld geführt [Lit 13, Lit 25]:

- gleichmäßigere Betonqualität über den gesamten Betonquerschnitt (weniger „schlechte Stellen“),
- höhere Betonqualität, die zu geringeren Bauteilabmessungen führen kann,
- problemloser Einbau in komplizierte Schalungsformen sowie bei dichten Bewehrungen,
- hohe Einbauleistungen,
- verringerte Lärmbelastung und
- verkürzte Bauzeit.

Diesen Vorteilen sind auch Nachteile und Risiken gegenüber zu stellen. Dazu gehören [Lit 13]:

- höhere Dosierungen (Zemente, Zusatzstoffe und Zusatzmittel),
- tendenziell größeres Schwinden und
- allgemeine Risiken einer „neuen“ Technologie.

Einen wesentlichen Anteil an der Entwicklung des selbstverdichtenden Betons hat das Aufkommen der dritten Fließmittelgeneration. Diese basieren auf Polycarboxylethern (PCE) (vgl. Skript Frischbeton) und verleihen dem Frischbeton bis dahin nicht gekannte Eigenschaften.

## 2 Grundlagen

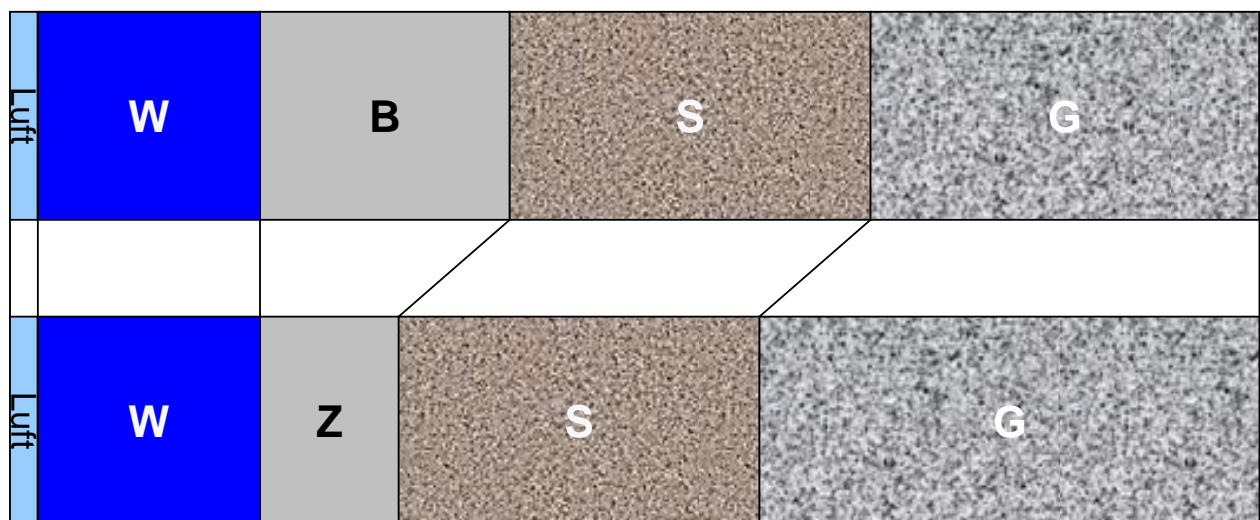
Das Grundkonzept des selbstverdichtenden Betons besteht darin, den Mörtel und Zementleim so zusammen zu setzen, dass die Gesteinskörnung in Schwebelage gehalten werden kann. Okamura verwirklichte diese Idee durch eine sehr exakte Sieblinienoptimierung, in Verbindung mit entsprechend geeigneten, zum Teil neuartigen Zusatzmitteln, die bei vorgegebenen Viskositätseigenschaften eine hohe Sedimentationsstabilität ermöglichen. Okamuras Konzept liegt die Idee der dichtesten Packung der Feststoffpartikel zu Grunde, angefangen vom feinsten Bestandteil des Bindemittels bis hin zum Größtkorn der Gesteinskörnung.

Damit SVB wie gewünscht funktioniert, muss er verschiedene Eigenschaften aufweisen. Zum einen muss er über ein ausreichend hohes Fließvermögen verfügen. So kann der Beton eigenständig entlüften, selbst bei hohen Bewehrungsgraden einen optimalen Verbund zwischen der Bewehrung und dem Betongefüge erreichen und das Risiko von Fehlstellen (z. B. Kiesnester) minimieren. Zum anderen muss SVB sehr gut zusammen halten, damit ein stabiles Gefüge besteht und es nicht zum Entmischen kommt. Beim Entmischen sind zwei Phänomene zu unterscheiden [Lit 25]:

- Sedimentation: Absinken der großen Gesteinskörner, Absondern von Wasser (Bluten)
- Separation: Die Matrix des fließenden Betons ist nicht mehr in der Lage, die große Gesteinskörnung mit zu transportieren.

Die gewünschten Eigenschaften des SVB werden durch eine gegenüber normalem Rüttelbeton veränderte Betonzusammensetzung erreicht (Bild 1). Sie zielt ab auf einen verringerten Anteil grober Gesteinskörnung, die in einer hochviskosen Mörtelmatrix quasi schwimmt ohne sich dabei direkt zu berühren. Zudem muss die Matrix sich entlüften können. Die gewünschte Viskosität wird durch ein niedriges Verhältnis Wasser/Feinteile und den Einsatz geeigneter Fließmittel eingestellt.

### Selbstverdichtender Beton



### Rüttelbeton

Bild 1: Vergleich der Zusammensetzung eines konventionellen Rüttelbetons und eines selbstverdichtenden Betons (W: Wasser; B: Bindemittel; Z: Zement; S: Sand; G: grobe Gesteinskörnung)

Aus rheologischer Sicht entspricht der selbstverdichtende Beton im frischen Zustand einem Bingham-Körper, der durch die Kenngrößen Fließgrenze und Viskosität beschrieben werden kann (Bild 2). Das Bingham'sche Fließgesetz beschreibt das Verformungsverhalten einer Suspension unter der Einwirkung einer Scherspannung. Es setzt sich zusammen aus einem konstanten Anteil, der Fließgrenze  $\tau_f$ , und einem variablen Anteil, der vom Verhältnis der aufgetragenen Scherspannung  $\tau$  und der Belastungsgeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  abhängig ist und durch die Viskosität  $\eta$  beschrieben wird. Die Fließgrenze gibt die Energie an, die von außen aufgebracht werden muss, damit die Suspension zu fließen beginnt. Die Viskosität beschreibt den Widerstand gegen die Verformung während des Fließens [Lit 14, Lit 20].

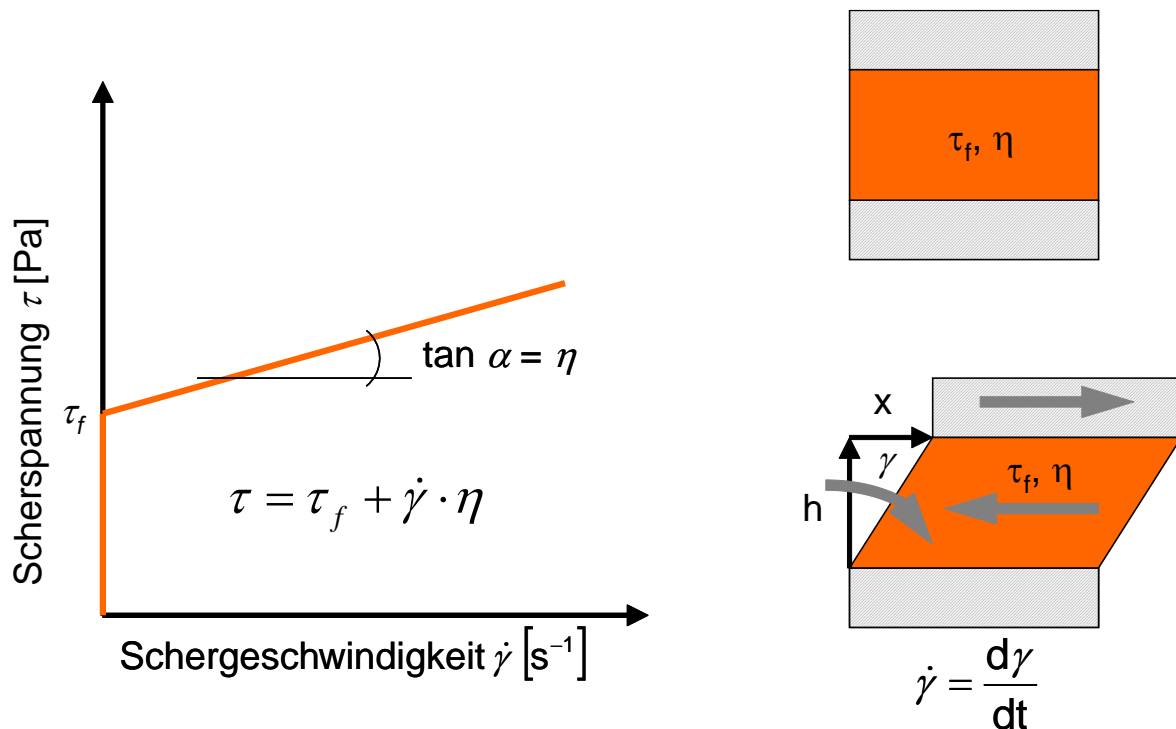


Bild 2: Bingham Modell zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Suspensionen mit den Kenngrößen Fließgrenze  $\tau_f$  und Viskosität  $\eta$

Sinkt die Schubspannung während des Fließvorganges im Beton unter den Wert der Fließgrenze  $\tau_0$ , so endet der Fließvorgang und der Beton kommt zum Stehen. Die Fließfähigkeit eines Betons ist folglich um so größer, je kleiner seine Fließgrenze ist.

Das zweite Kriterium zur Beurteilung eines SVB ist die Viskosität. Sie ist ein Maß für die aktivierte innere Reibung in einer Substanz im Zuge einer aufgetragenen Belastung. Je kleiner die vorhandenen inneren Reibungskräfte sind, desto kleiner ist die Viskosität  $\eta$ . Je geringer die Viskosität ist, desto schneller fließt der Beton beim Ausbreitvorgang.

Die Sedimentationsneigung eines SVB ist umso größer, je geringer die Werte für Viskosität und Fließgrenze sind. Unterschreitet die Fließgrenze einen kritischen Wert, ist die Matrix nicht mehr in der Lage, die grobe Gesteinskörnung in Schwebelage zu halten oder beim Fließvorgang mitzutransportieren. Eine gleichmäßige Verteilung der groben Gesteinskörnung im Beton ist dann nicht mehr gegeben. Um die notwendige Sedimentationsbeständigkeit einzuhalten, darf die Fließgrenze  $\tau_0$  nicht zu weit absinken. Die Folge einer mangelnden Gefügestabilität ist Absetzen und Bluten.

Für Leime und Mörtel können die rheologischen Eigenschaften in so genannten 2-Punkt-Versuchen z. B. mit Rotationsrheometern bestimmt werden. Diese Versuche heißen so, weil

während eines Versuchs durch die Variation der Belastungsgeschwindigkeit beide Kennwerte ermittelt werden können. Für Beton gelingt es in der Regel nicht, die benötigten physikalischen Randbedingungen (Erzeugen einer laminaren Strömung sowie Verhindern des Ausbildens von Scherfugen und des Einflusses der Wandreibung) einzuhalten. Dies liegt am weiten Bereich der Korndurchmesser des Betons vom  $\mu\text{m}$ - bis in den  $\text{cm}$ -Bereich. 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 Grobkornverteilung) begutachtet werden.

### 3 Anforderungen an die Betonzusammensetzung

#### 3.1 Wahl der Ausgangsstoffe

Die Frischbetoneigenschaften auf SVB basieren auf einem deutlich reduzierten Grobkorngehalt sowie einer fließfähigen Mörtelmatrix. Zusammen mit Wasser und Fließmittel bildet das Mehlkorn (Zement und Zusatzstoffe mit einem Korndurchmesser  $d < 0,125 \text{ mm}$ ) die tragfähige Suspension (Leim), in der die groben Gesteinskörner „schwimmen“. Diese Eigenschaften können entweder durch einen stark erhöhten Mehlkorngehalt und/oder durch die Zugabe von Stabilisierern (ST) erreicht werden. Je nach gewähltem Konzept kann SVB in drei Typen zugeordnet werden (Tabelle 1):

Tabelle 1: Mehlkorngehalt der SVB-Typen [Lit 25]

SVB-Typ	Mehlkorngehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]
Mehlkornotyp	550 – 650
Stabilisierertyp	350 – 500
Kombinationstyp	abhängig von der Stabilisiererzugabe

Der hohe Mehlkorngehalt, die noch nicht standardisierte Konsistenzprüfung und das „Fehlen“ der Verdichtung schließen ein Herstellen von selbstverdichtendem Beton nach DIN EN 206-1 [Lit 8] in Verbindung mit DIN 1045-2 [Lit 6] und DIN 1045-3 [Lit 7] zur Zeit noch aus.

Für ein ausreichendes Fließvermögen und einen genügenden Zusammenhalt ist ein optimal abgestimmtes Verhältnis von Mehlkorn-, Wasser- und Fließmittelmenge sowie eine geeignete Zusammensetzung des Mehlkorns unverzichtbar. Die Wassermenge muss dem Wasseranspruch des Mehlkorns entsprechen. Eine veränderte Zusammensetzung des Mehlkorns (z. B. Substitution von Flugasche gegen Gesteinsmehl) ändert den Wasseranspruch und in der Folge die Frischbetoneigenschaften. Eine höhere Wasserdosierung wirkt sich zugleich auf das Fließ- und das Zusammenhaltevermögen des Betons aus. Das eventuell angestrebte bessere Fließverhalten geht dann einher mit einem schlechteren Zusammenhalt und führt zu einem instabilen Frischbetongefüge. Bereits Veränderungen der Zugabewassermenge von  $\pm 3 \text{ l/m}^3$  können ausreichen, um negative Veränderungen wie Sedimentation, Separation, Lufteinschlüsse und eine geringere Fließfähigkeit zu bewirken [Lit 25].

Wassergehalt und Fließmittelmenge beeinflussen die Kenngrößen  $\tau_0$  und  $\eta$  unterschiedlich: Eine steigende Wassermenge vermindert die Fließgrenze  $\tau_0$  und die Viskosität  $\eta$ , während eine steigende Fließmittelmenge die Fließgrenze  $\tau_0$  herabsetzt (Bild 3). Derzeit werden fast ausschließlich Fließmittel der dritten Generation eingesetzt, die als Wirkstoff Polycarboxylat-ether (PCE) nutzen (vgl. Skript Frischbeton). Diese Fließmittel sind leistungsfähiger als Melaminharze und Lignin- oder Naphthalinsulfonate, reagieren aber auch empfindlicher auf unterschiedliche Bindemittel und Temperaturveränderungen.

Als Mehlkorn wird neben Zement insbesondere Flugasche und/oder Kalksteinmehl eingesetzt. Außerdem sind Hüttensande, Silicastaub und andere mahlfeine Betonzusatzstoffe möglich. Der erhöhte Mehlkorngehalt verbessert die Fließfähigkeit. Ein zu hoher Gehalt an sehr feinen Partikeln kann bei sonst gleichen Bedingungen die Fließfähigkeit herabsetzen. Das verwendete Mehlkorn macht sich nicht nur bei rheologischen Eigenschaften bemerkbar. Es



beeinflusst das optische Erscheinungsbild der Betonoberfläche. Kalkstein- und Quarzmehl führen zu einer helleren Oberfläche als Flugasche [Lit 25].

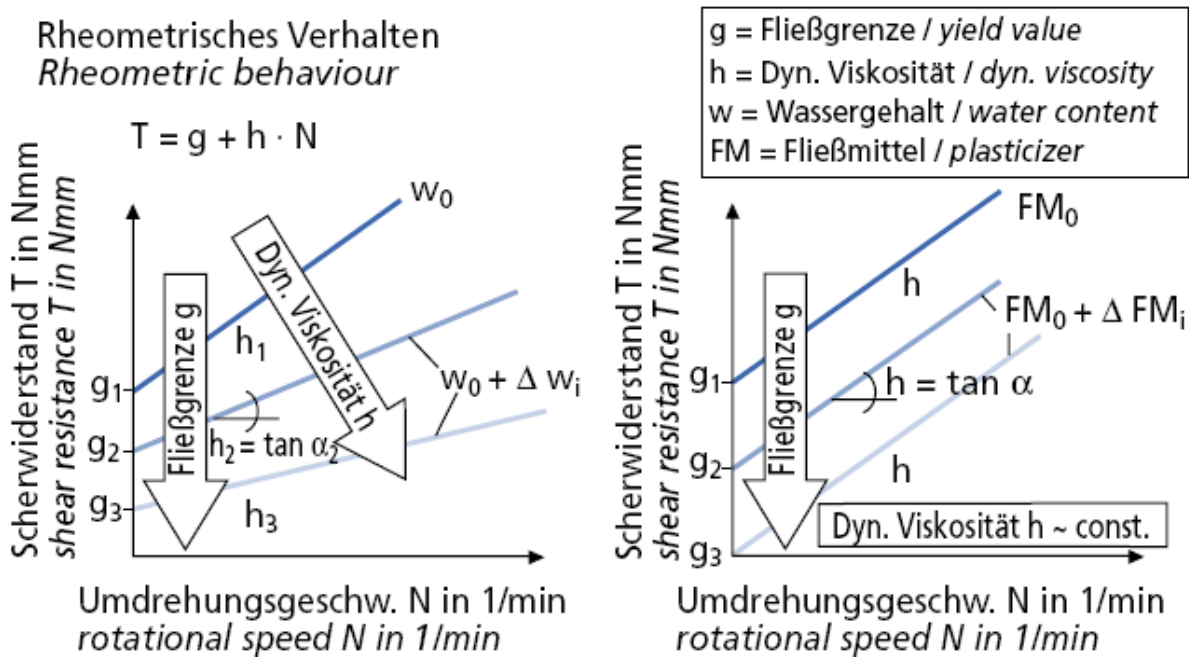


Bild 3: Einfluss von Zugabewasser und Fließmittel auf die rheologischen Eigenschaften von Zement- bzw. Mehlkornsuspensionen [Lit 15]

Als feine und grobe Gesteinskörnung kann sowohl ungebrochene als auch gebrochene Gesteinskörnung verwendet werden. Im Allgemeinen wird das Größtkorn auf 16 bis 20 mm begrenzt, um die Sedimentation der groben Gesteinskörnung zu reduzieren. Eine runde Kornform begünstigt das Fließvermögen, während eine gebrochene und kantige Kornform unter sonst gleichen Bedingungen die Fließfähigkeit vermindern kann. Dieses Verhalten wird um so ausgeprägter, je geringer die Mehlkornmenge im Beton ist [Lit 20].

### 3.2 Mischungsentwurf

Der Mischungsentwurf eines selbstverdichtenden Betons ist primär darauf ausgerichtet, die gewünschten rheologischen Eigenschaften zu erreichen. Zugleich dürfen natürlich die geforderten Festbetoneigenschaften nicht außer Acht gelassen werden. Im Gegensatz zum Vorgehen bei Normalbeton, wird selbstverdichtender Beton durchgehend volumetrisch zusammengesetzt. Das ursprüngliche Verfahren geht auf Okamura [Lit 18] zurück. Es stellt eine Möglichkeit dar, einen SVB mit guten Verarbeitbarkeitseigenschaften und einer hohen Sedimentationsbeständigkeit zu entwerfen. Die Entwicklung der Betonzusammensetzung erfolgt mit Hilfe empirisch gewonnener Kennwerte sowie Untersuchungen am Leim und Mörtel.

#### 3.2.1 Festlegen des Luftgehalts

Zunächst wird der Luftgehalt  $V_a$  festgelegt. Die Angaben über Luftgehalte im Frischbeton von SVB schwanken erheblich. In Deutschland wird meist ein Luftgehalt von weniger als 2 Vol.-% angestrebt. In der internationalen Literatur wird von 4 bis 7 Vol.-% Luftporen ausgegangen. Welcher Wert angenommen wird, hängt im wesentlichen von den Erfahrungen des Betonherstellers ab. Nach der Betonherstellung sollte der angenommene Luftgehalt überprüft und unter Umständen korrigiert werden. Zudem ist der Luftporengehalt zu beachten, der zum Beispiel über Luftporenbildner zusätzlich eingebracht wird (LP-Beton).

$V_a: 2 \text{ Vol.-%} \approx 0,020 \text{ m}^3$

### 3.2.2 Volumen der groben Gesteinskörnung festlegen

Der Gehalt an grober Gesteinskörnung  $V_g$  ( $> 4 \text{ mm}$  bzw.  $2 \text{ mm}$ ) wird so gewählt, dass das lose Schüttvolumen in der Regel 50 % des luftfreien Betonvolumens entspricht (Bild 4). Dies wird als Optimum angesehen. Abweichungen nach oben bis maximal 60 % sind bei geeignetem Kies möglich. Das Volumen der Gesteinskörnung entspricht demnach:

$$V_g = 0,5 \dots 0,6 \cdot (1 - V_a) \cdot \frac{\rho_{gs}}{\rho_g}$$

$V_g$     Volumen grobe Gesteinskörnung [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_a$     Volumen Luft [ $\text{m}^3$ ]  
 $\rho_g$     Rohdichte grobe Gesteinskörnung [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]  
 $\rho_{gs}$     Schüttdichte grobe Gesteinskörnung [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

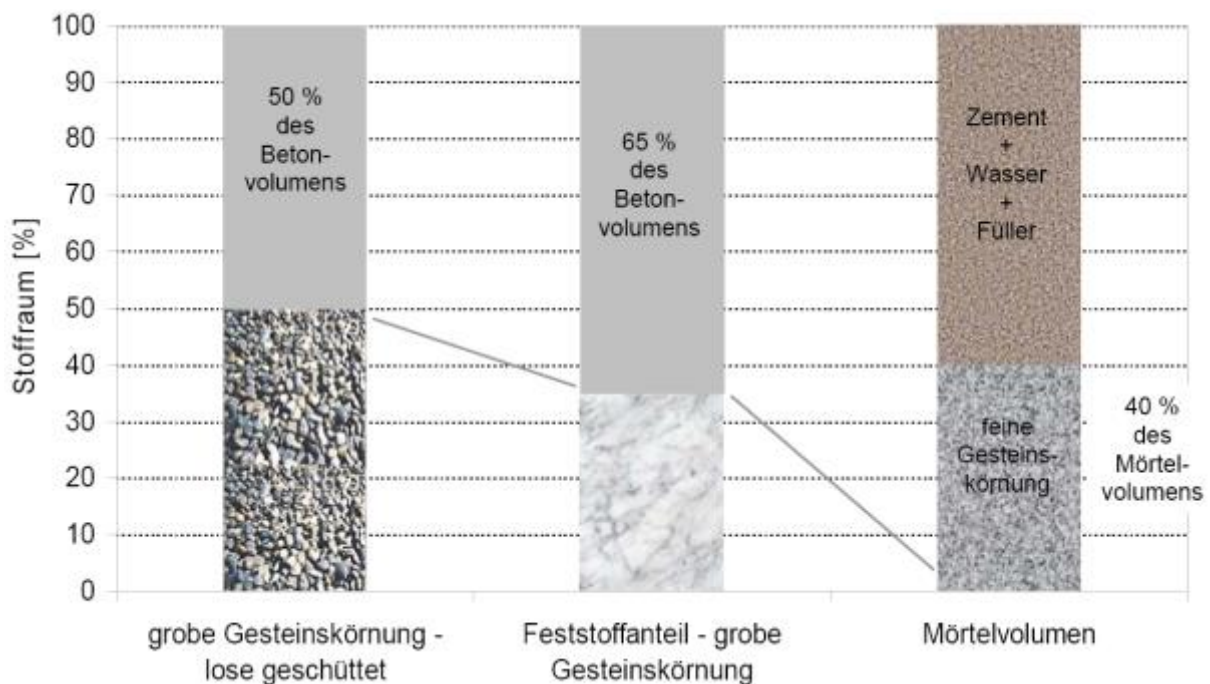


Bild 4: Mischungsentscheidung nach Okamura [Lit 23]

### 3.2.3 Volumen für die feine Gesteinskörnung (Sand) festlegen

Das Volumen  $V_{s \geq 0,125}$  zwischen  $0,125 \text{ mm}$  und  $4 \text{ mm}$  bzw.  $2 \text{ mm}$  der feinen Gesteinskörnung (Sand oder Brechsand) wird auf 40 % des Mörtelvolumens festgelegt (Bild 4). Der Mehlkornanteil  $V_{s < 0,125}$  der feinen Gesteinskörnung wird dem Feinststoffvolumen  $< 0,125 \text{ mm}$  zugerechnet. Das Volumen der feinen Gesteinskörnung errechnet sich zu:

$$V_s = V_{s \geq 0,125} + V_{s < 0,125}$$

$V_s$     Volumen feine Gesteinskörnung gesamt [ $\text{m}^3$ ]  
 $V_{s \geq 0,125}$     Volumen feine Gesteinskörnung  $d \geq 0,125 \text{ mm}$  [ $\text{m}^3$ ]

$$V_s = \frac{0,4 \cdot (1 - V_a - V_g)}{1 - \frac{R_{s < 0,125}}{100}}$$

$V_{s < 0,125}$  Volumen feine Gesteinskörnung  $d < 0,125$  mm [m<sup>3</sup>]  
 $R_{s < 0,125}$  Volumenanteil der feinen Gesteinskörnung  $d < 0,125$  mm [Vol.-%]  
 $V_g$  Volumen grobe Gesteinskörnung [dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]  
 $V_a$  Volumen Luft [dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

### 3.2.4 Bestimmung von Wasser- und Mehlkorngehalt

Das verbleibende Volumen stellt das Leimvolumen  $V_{paste}$  dar. Es setzt sich zusammen aus dem Volumen der Feinststoffe (Zement, Zusatzstoffe (Flugasche, Silicastaub, Kalksteinmehl, Quarzmehl usw.) und dem Mehlkornanteil der feinen Gesteinskörnung) und dem Wasser.

$$V_{paste} = 1 - V_a - V_g - (1 - R_{s < 0,125}) \cdot V_s$$

$V_{paste}$  Volumen Leim [m<sup>3</sup>]  
 $V_s$  Volumen feine Gesteinskörnung gesamt [m<sup>3</sup>]  
 $R_{s < 0,125}$  Volumenanteil der feinen Gesteinskörnung  $d < 0,125$  mm [Vol.-%]  
 $V_g$  Volumen grobe Gesteinskörnung [m<sup>3</sup>]  
 $V_a$  Volumen Luft [m<sup>3</sup>]

Maßgebliche Grundlage für die Zusammensetzung des Bindemittelleims und damit des Mehlkorns sind die betontechnologischen Randbedingungen. Diese leiten sich aus den Anforderungen der DIN 1045-2 bzw. DIN EN 206-1 an den Betonentwurf ab. Zu den betontechnologischen Randbedingungen zählen z. B. der Mindest-Zementgehalt, der maximale Wasserbindemittelwert, die angestrebten Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, Dichtigkeit ...) und die Verarbeitbarkeitseigenschaften. Hinzu kommen wirtschaftliche Aspekte. Das Wasser- und Mehlkornvolumen berechnet sich wie folgt:

$$V_{paste} = V_p + V_w$$

$$V_p = V_b + V_{s < 0,125}$$

$$V_b = V_{cem} + V_f$$

$V_{paste}$  Volumen Leim [m<sup>3</sup>]  
 $V_p$  Volumen Mehlkorn  $d < 0,125$  mm [m<sup>3</sup>]  
 $V_w$  Volumen Wasser [m<sup>3</sup>]  
 $V_b$  Volumen Bindemittel [m<sup>3</sup>]  
 $V_{s < 0,125}$  Volumen feine Gesteinskörnung  $d < 0,125$  mm [m<sup>3</sup>]  
 $V_{cem}$  Volumen Zement [m<sup>3</sup>]  
 $V_f$  Volumen Zusatzstoffe [m<sup>3</sup>]

Die rheologischen Eigenschaften der aus Zement, Betonzusatzstoffen, Zugabewasser und Fließmittel bestehenden Mehlkornsuspension werden vom Wasserfeststoffverhältnis und vom Fließmittelgehalt bestimmt. Die Zusammensetzung des Leims kann nicht explizit angegeben werden. Sie muss iterativ ermittelt werden, da sich die tatsächlichen Volumenanteile des Mehlkorns erst bei bekanntem Wassergehalt bestimmen lassen. Der optimale Wassergehalt wiederum hängt von der Zusammensetzung des Mehlkorns (Wasseranspruch), vom vorgesehenen Sand sowie vom verwendeten Fließmittel ab. 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 (Bild 5). Ab diesem Wassergehalt sind die Suspensionseigenschaften durch Wasser und Fließmittel steuerbar [Lit 15].

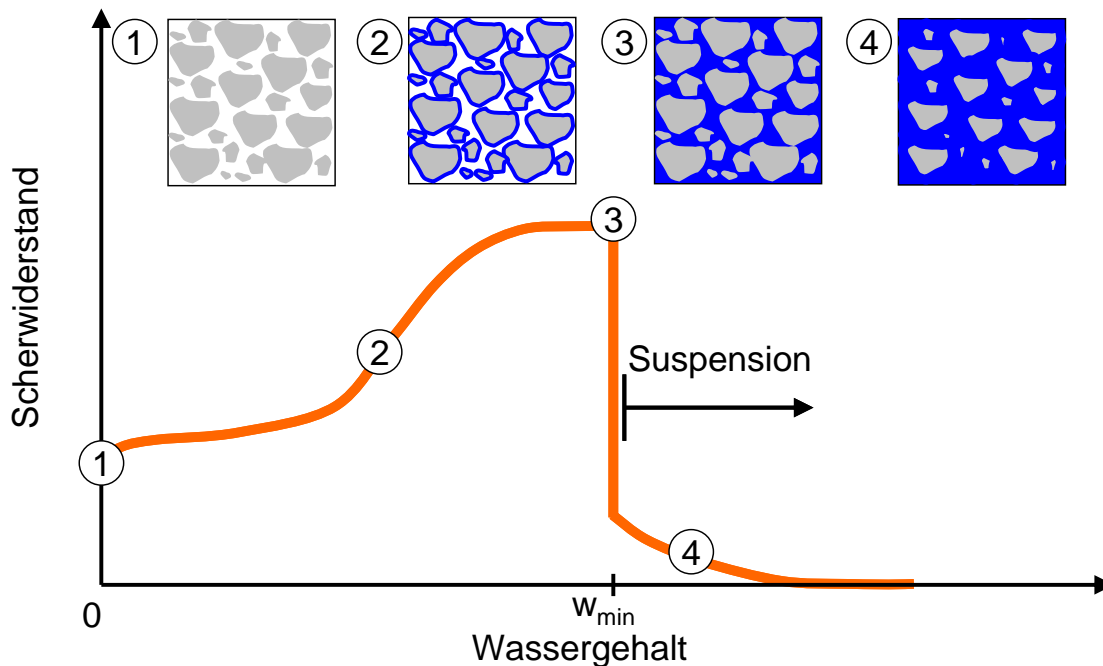


Bild 5: Scherwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt beim Übergang eines Kornhaufwerks in eine Suspension [Lit 22]

Das optimale Verhältnis von Wasservolumen  $V_w$  zu Mehlkornvolumen  $V_p$  und damit die optimale Zusammensetzung des Leims wird mit Hilfe zweier einfacher Versuche ermittelt, dem Setzfließversuch und dem Trichterauslaufversuch.

### Leimversuche

Zunächst gilt es im Setzfließversuch, den sogenannten  $\beta_p$ -Wert zu bestimmen. Er kennzeichnet das Wasser-Mehlkornvolumen  $V_w/V_p$ , bei dem das gesamte Wasser durch das Mehlkorn gebunden ist. Der  $\beta_p$ -Wert einer gewählten Bindemittelzusammensetzung wird in Ausbreitfließversuchen mit Wasser-Mehlkorn-Verhältnissen  $V_w/V_p$  von 1,1; 1,2; 1,3 und 1,4 ermittelt und das relative Ausbreitfließmaß  $\Gamma_{paste}$  [-] des Bindemittelleims berechnet (Bild 6). Das relative Ausbreitfließmaß bestimmt sich dabei aus dem jeweiligen mittleren Ausbreitfließmaß  $r = (r_1 + r_2)/2$  und dem unteren Radius des Hägermann-Trichters  $r_0 = 100$  mm.

Die so gewonnenen Werte des Ausbreitfließmaßes  $\Gamma_{paste}$  werden auf der Abszisse in Abhängigkeit von den eingestellten Wasser-Mehlkorn-Verhältnissen  $V_w/V_p$  aufgetragen (Bild 7). Normalerweise ergibt sich ein linearer Zusammenhang. Der Schnittpunkt der resultierenden Regressionsgrade mit der Ordinate ( $r = r_0$ ) liefert den  $\beta_p$ -Wert, der Auskunft über das Wasserrückhaltevermögen des Mehlkorns gibt. Bei diesem Wasser-Mehlkorn-Verhältnis ist die Verformung des Leims Null und zugleich sind alle Hohlräume des Mehlkornhaufwerks mit Wasser gefüllt. Zur sicheren Bestimmung des  $\beta_p$ -wertes sollten je Leim mindestens vier Ausbreitfließversuche durchgeführt werden. Für die Auswertung und Bestimmung des  $\beta_p$ -wertes sollten nur relative Ausbreitflächen herangezogen werden, die Werte größer 1 und kleiner 4 aufweisen.

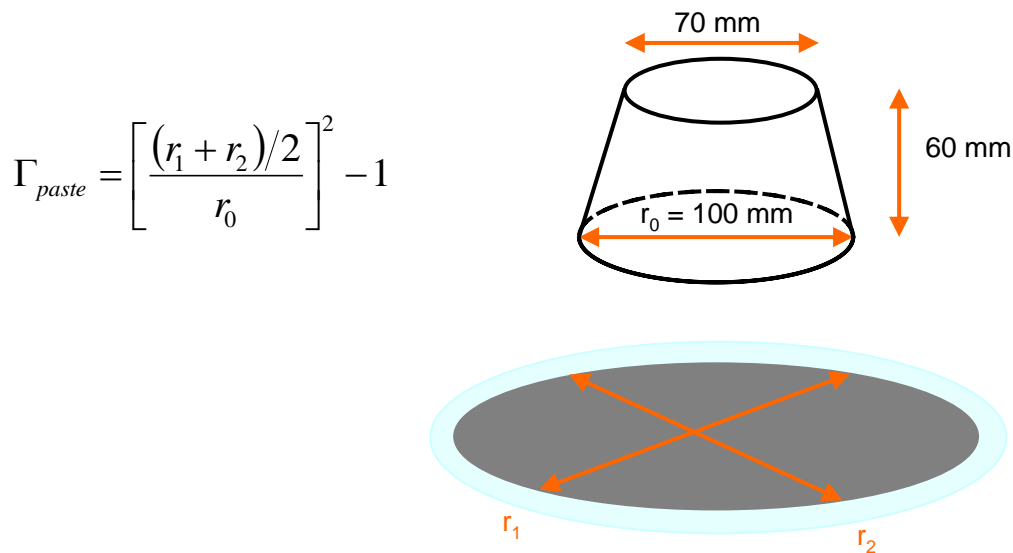


Bild 6: Prüfung des relative Ausbreitfließmaßes  $\Gamma_{paste}$  im Leimfließversuch mit dem Hägermann-Trichter

Der  $\beta_p$ -Wert kann zwischen 0,5 bis 1,4 liegen. Eine große Steigung der Regressionsgeraden weist dabei auf eine besonders stabile Mehlkornzusammensetzung hin. Je geringer die Steigung der Geraden ist, desto sensibler reagiert das Mehlkornmischung auf Änderungen des Wassergehaltes.

Der  $\beta_p$ -Wert wird in der Folge als Richtwert für den Startwassergehalt für die weitere experimentelle Optimierung herangezogen. Je nachdem, welches Bindemittelgemisch zum Einsatz kommt, kann eine Abminderung des  $\beta_p$ -Wertes um bis zu 15 %, aber auch eine Erhöhung um bis zu 10 % angebracht sein [Lit 23].

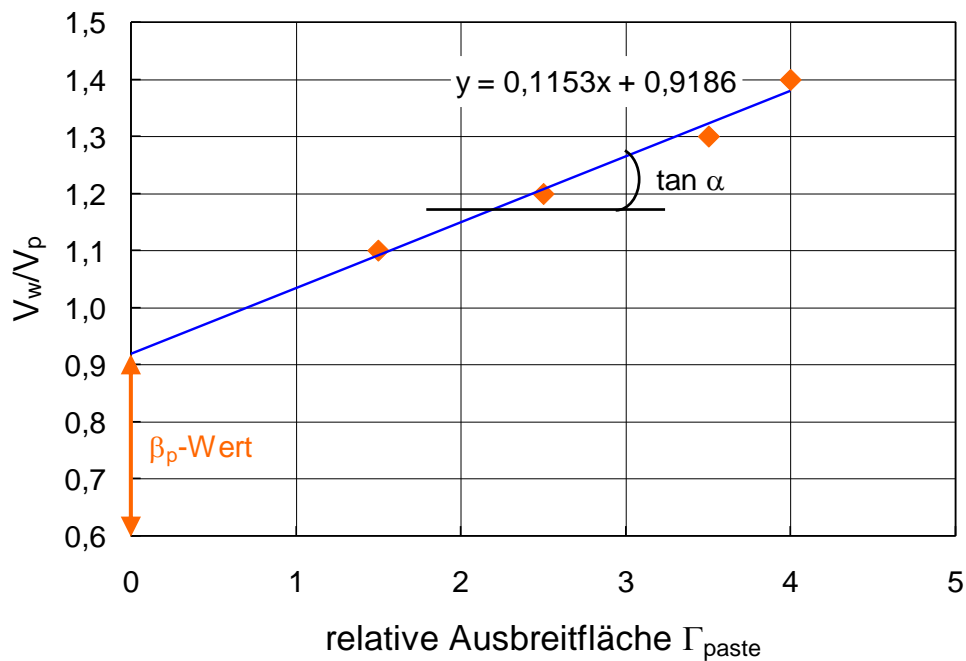


Bild 7: Bestimmung des  $\beta_p$ -Wertes [Lit 23]

### Mörtelversuche

Zur weiteren Charakterisierung des selbstverdichtenden Betons werden Serien von Setzfließ- und Durchströmungsversuchen mit Sand-Bindemittelgemischen durchgeführt. Dazu wird von einem  $V_w/V_p$ -Wert von  $0,8 \beta_p$  bis  $0,9 \beta_p$  ausgegangen [Lit 19]. Die zuvor ermittelte Leimsuspension wird um die feine Gesteinskörnung ergänzt. Der Stoffraum des Mörtels setzt sich mit 60 Vol.-% Leimsuspension und 40 Vol.-% feine Gesteinskörnung so zusammen, wie es später für den selbstverdichtenden Beton eingesetzt wird. In den Mörtelversuchen soll das am besten geeignete Fließmittel und die optimale Fließmitteldosierung gefunden werden.

Nach Okamura [Lit 18] wird für diese Versuche der Mörtel mit Hilfe des Fließmittels so eingestellt, dass er im Setzfließversuch ein relatives Ausbreitmaß von  $\Gamma_m = 5$  erreicht, was einem Ausbreitfließmaß von  $r = 245$  mm entspricht. Als zweite Bedingung muss die Trichterauslaufzeit  $t$  des Mörtels zwischen 9 und 11 Sekunden liegen. Sind beide Randbedingungen erfüllt, dann ist gemäß Okamura der optimale  $V_w/V_p$ -Wert gefunden. Die relative Trichterauslaufzeit  $R_m$  beträgt dann etwa  $1 [s^{-1}]$  (Bild 8). Die Versuchsreihe ist mit einem niedrigeren  $V_w/V_p$ -Wert zu wiederholen, falls die Trichterauslaufzeit kleiner ist. Bei einer höheren Auslaufzeit sind die Versuche mit einem höheren  $V_w/V_p$ -Wert erneut durchzuführen.

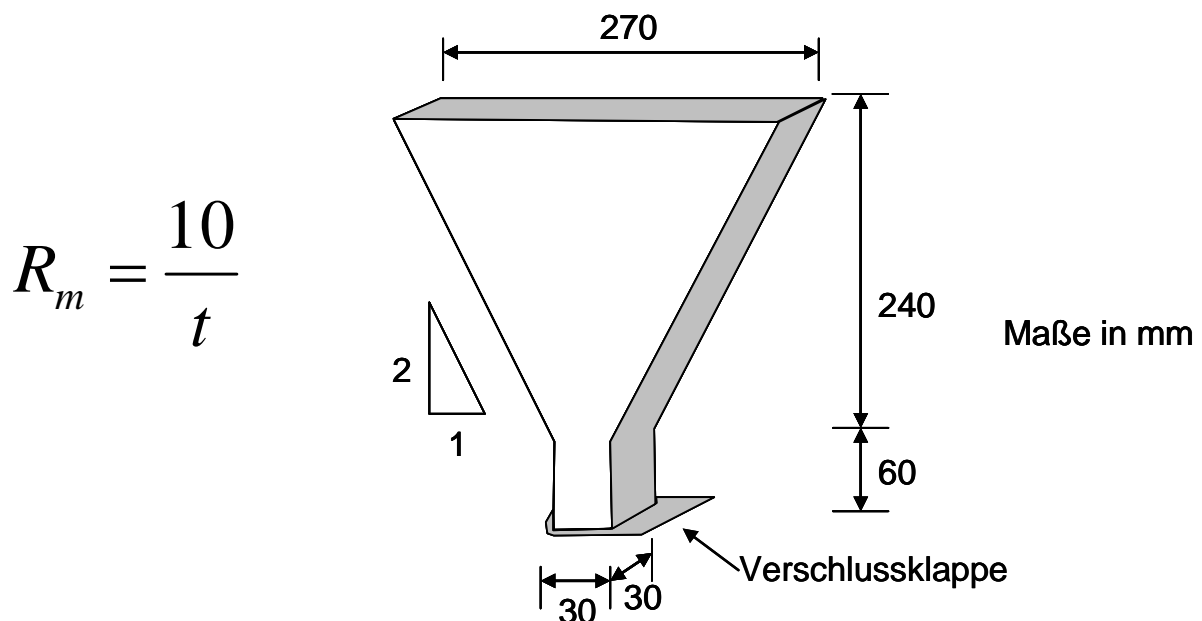


Bild 8: Trichterauslaufversuch für Mörtel

Für die Optimierungsversuche muss ein  $V_w/V_p$ -Wert zwischen  $0,8 \beta_p$  und  $0,9 \beta_p$  eingehalten werden. Gelingt es innerhalb dieser Grenzen nicht, ein relatives Ausbreitmaß von  $\Gamma_m = 5$  und eine Trichterauslaufzeit  $t$  zwischen 9 und 11 Sekunden einzustellen, dann ist die gewählte Materialzusammenstellung als ungeeignet zu verwerfen. Neue Leimversuche sind in diesem Fall mit einer neuen Bindemittel-Füller-Kombination durchzuführen [Lit 19].

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit können gegebenenfalls auch kleinere Auslaufzeiten sinnvoll sein. Mit abnehmender Viskosität sind jedoch negative Einflüsse auf die Sedimentationsbeständigkeit und die Robustheit zu erwarten.

Das Fließmittel/Mehlkorn-Verhältnis wird in den Mörtelversuchen nur annähernd festgelegt, da sich das Fließmittel im Mörtel anders verhält als im Frischbeton. Dies kann zum Teil an Mischeffekten durch die abweichende Mischdauer und an der unterschiedlichen Zugaben der

Mischungsbestandteile liegen. Das genaue Fließmittel/Mehlkorn-Verhältnis wird daher am Frischbeton bestimmt [Lit 19].

Die Mörtelversuche können im Vorfeld schon herangezogen werden, um die „Sensibilität“ unterschiedlicher Fließmitteltypen aufzuzeigen. Der Kurvenverlauf aus Konsistenzsteigerung in Abhängigkeit von der Fließmitteldosierung zeigt gut die Charakteristik der Zusatzmitteltypen auf (Bild 9). Die Sättigungsdosierung und der Dosierspielraum für die Anwendung im selbstverdichtenden Beton können so gut abgeschätzt werden [Lit 23].

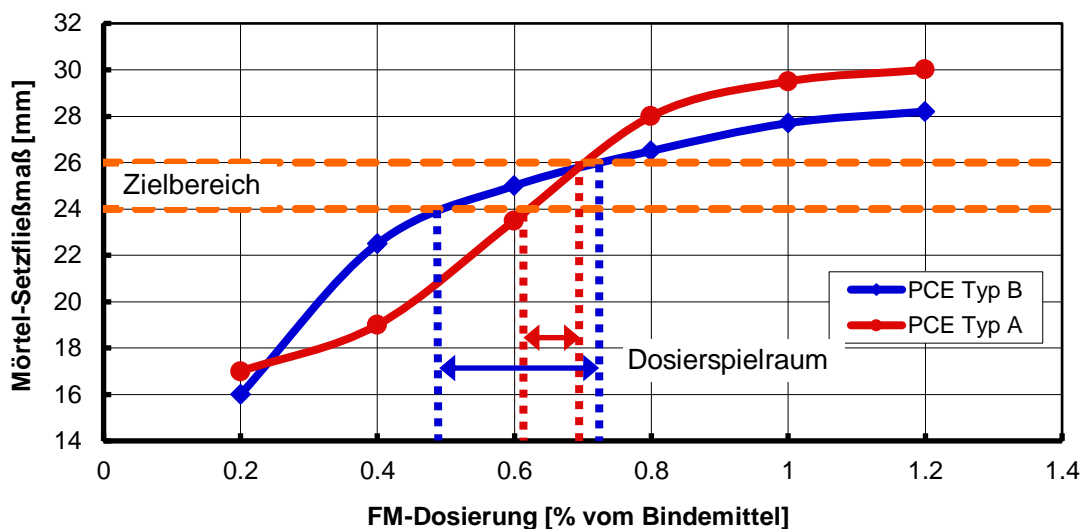


Bild 9: Bestimmung der Sättigungsdosierung von Fließmitteln [Lit 23]

### 3.3 Frischbetoneigenschaften

Nachdem die Mörtelversuche erfolgreich abgeschlossen sind, muss noch die optimale Zusatzmitteldosierung am Beton überprüft werden. Verzögerer und Luftporenbildner sind im erforderlichen Umfang zuzugeben. Für die Überprüfung wird zu dem zuvor entwickelten Mörtel die grobe Gesteinskörnung, mit dem zu Beginn festgelegten Anteil (50 Vol-% lose geschüttet vom luftporenfreien Gesamtbetonvolumen) zugegeben. Die Eigenschaften des Betons werden mit einem Setzfließversuch (siehe Kapitel 3.4.1) in Kombination mit einem Trichterauslaufversuch (siehe Kapitel 3.4.2.2) überprüft. Nach Okamura sollte sich, wenn die Grenzen im Leim- und Mörtelversuch eingehalten wurden, ohne weitere Veränderung ein Setzfließmaß von mindestens  $650 \pm 50$  mm und eine Fließzeit von 10 bis 20 Sekunden einstellen. Diese Grenzen wurden inzwischen aufgeweitet [Lit 10]. Dennoch kann die Verarbeitbarkeit eines SVB mit Hilfe dieser beiden Methoden beurteilt werden (Bild 10). Das innere Fenster kennzeichnet einen ausreichend fließfähigen und nicht zum Entmischen neigenden SVB. Außerhalb des inneren Fensters liegen Betonzusammensetzungen, die zur Sedimentation neigen, nicht ausreichend entlüften (Lufteinschlüsse) oder nicht ausreichend fließen (Stagnation) [Lit 14]. Für die endgültige Beurteilung eines selbstverdichtenden Betons müssen neben dem Verarbeitungsfenster noch weitere Untersuchungen herangezogen werden (siehe Kapitel 3.4).

Sollten sich die erforderlichen Frischbetoneigenschaften nicht einhalten lassen, kann durch geringfügige Variation der Fließmitteldosierung eine Korrektur vorgenommen werden. Änderungen an der eigentlichen Rezeptur sollten nicht erfolgen, da damit das stabile System sehr leicht gestört werden kann.

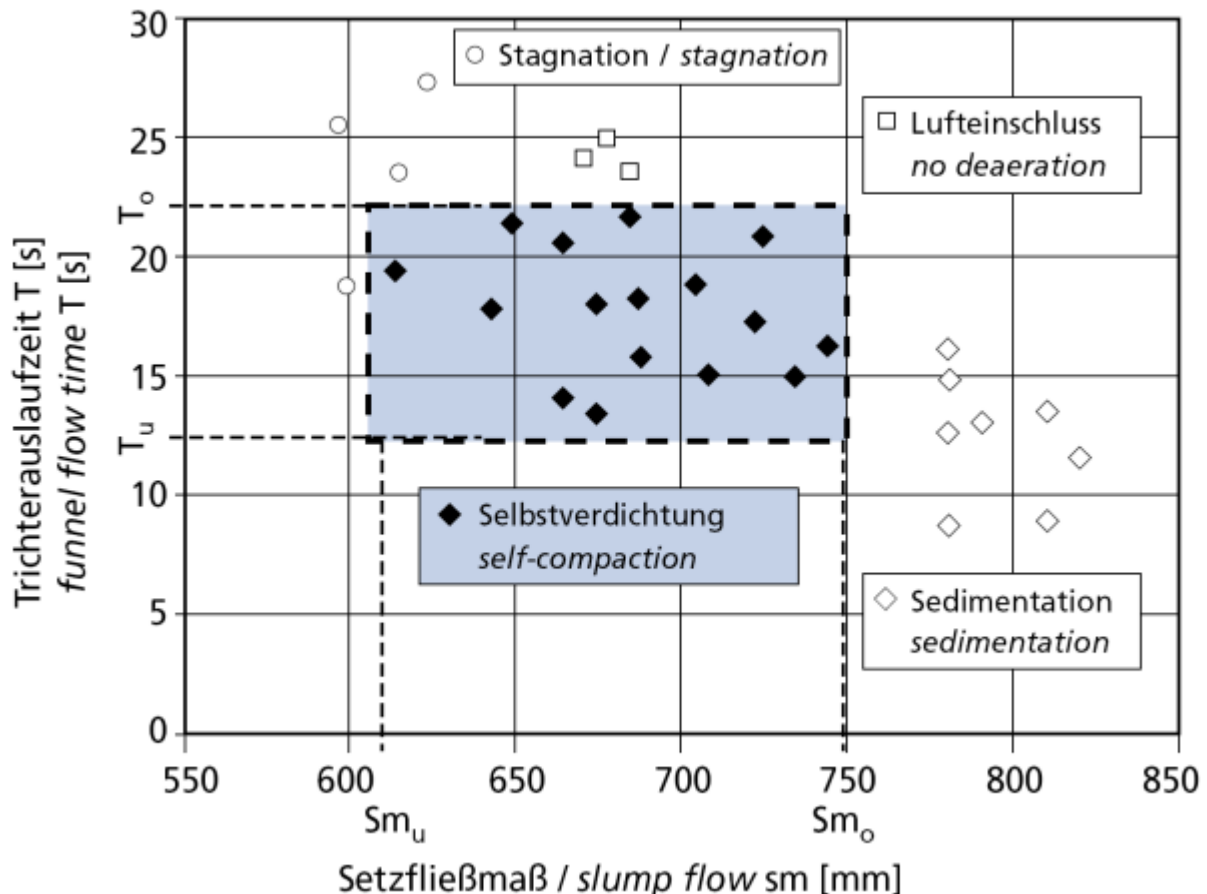


Bild 10: Rheologische Eigenschaften eines SVB in Abhängigkeit von Setzfließmaß und Trichterauslaufzeit mit Verarbeitbarkeitsfenster für Selbstverdichtung [Lit 14]

### 3.4 Prüfverfahren für die Frischbetoneigenschaften

Die Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften weichen von denen an einen Normalbeton ab. Daher wurden für selbstverdichtende Betone neue Prüfverfahren entwickelt. Mit ihnen kann die Fließfähigkeit, die Viskosität, die Sedimentationseigenschaften und das Risiko des Blockierens der groben Gesteinskörnung durch die Bewehrung beurteilt werden. Diese Prüfverfahren werden nach E DIN EN 206-9 [Lit 10] zur Einteilung in Klassen genutzt, mit deren Hilfe die Anforderungen an einen SVB je nach Art der Anwendung genauer spezifiziert werden können. Hierzu zählen Einschränkungen im Zusammenhang mit:

- der Geometrie der Betonbauteile sowie Art, Anordnung und Anzahl der Einbauteile (Bewehrungsdichte und –abstand, Betondeckung und Aussparungen, usw.),
- der Betoniereinrichtung (Pumpe, direkt vom Fahrmischer, Betonkübel),
- der Betoneinbringung (Anzahl der Einbringstellen) sowie
- der Oberflächenbearbeitung /Nachbehandlung.

Das System der Klasseneinteilung ermöglicht eine geeignete Festlegung für SVB, um diese Anforderungen, mit Hilfe von vier wesentlichen Prüfparameter zu charakterisieren. Die sind:

- Fließfähigkeit und Füllfähigkeit: Setzfließmaß SF
- Viskosität: Viskosität VS oder VF
- Blockierneigung: Blockierneigung PL oder PJ;
- Sedimentationsstabilität/Entmischungsneigung: Sedimentationsstabilität SR.



Die Eigenschaften von selbstverdichtendem Beton, die für eine gegebene Anwendung geeignet sind, sollten aus diesen vier Parametern gewählt werden und anschließend durch Angabe einer Klasse oder eines Zielwertes festgelegt werden.

Der Ausschreibende des Betons sollte nur diejenigen Eigenschaften des Frischbetons wählen, die für die jeweilige Anwendung des SVB geeignet sind. Ferner sollte die Festlegung von nicht benötigten Anforderungen an den Beton vermieden werden.

Im Falle von Betonfertigteilen ist es üblich, die Eigenschaften des fertigen Betons unmittelbar am Produkt nachzuweisen. Für Transport- oder Baustellenbeton sollten die Parameter und Klassen auf der Grundlage der Erfahrungen des Bauunternehmens, des Betonherstellers oder basierend auf besonderen Versuchen sorgfältig gewählt, kontrolliert und begründet werden. Es ist daher wichtig, dass der Ausschreibende des Betons und der Betonhersteller vor Beginn des Betonierens diese Parameter besprechen und eindeutig definieren. In der Regel wird das Setzfließmaß festgelegt.

Durchgangsfähigkeit, Viskosität und Stabilität beeinflussen zwar die Eigenschaften des Festbetons, sie sollten jedoch nur dann festgelegt werden, wenn dies im Einzelfall erforderlich ist. Wird wenig oder keine Bewehrung verwendet, kann es sein, dass Anforderungen an die Durchgangsfähigkeit unnötig sind. Wird eine gute Oberflächenbeschaffenheit gefordert oder im Fall einer hohen Bewehrungsdichte, kann die Viskosität wichtig sein; in den meisten anderen Fällen sollte diese jedoch nicht festgelegt werden. Die Stabilität gewinnt bei höherer Fließfähigkeit und niedrigerer Viskosität an Bedeutung. Falls sie festgelegt werden muss, sollte jedoch die Klasse SR1 (siehe Kapitel 3.4.4) für die meisten Anwendungen ausreichen.

Anforderungen an die erforderliche Zeitspanne, in der die festgelegte Konsistenz gehalten werden muss, hängen vom Transport und von der Einbauzeit sowie von der Betontemperatur ab. Sie sollten bestimmt und festgelegt werden, damit die Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons im frischen Zustand während dieses Zeitraums aufrechterhalten werden.

Sofern möglich, sollte selbstverdichtender Beton in einem ununterbrochenen Arbeitsgang eingebracht werden. Daher sollte die Liefergeschwindigkeit der Einbaugeschwindigkeit angepasst und mit dem Hersteller vereinbart werden, um Unterbrechungen bei der Einbringung auf Grund von Verzögerungen bei der Lieferung oder nach dem Eintreffen des Betons auf der Baustelle zu vermeiden.

### **3.4.1 Prüfung der Fließfähigkeit von selbstverdichtendem Beton**

Mit dem Setzfließversuch (Slump-Flow-Test) werden das Setzfließmaß  $SF$  und die Zeit  $t_{500}$  (siehe Kapitel 3.4.2.1) bestimmt. Sie ermöglichen die Bewertung der Fließfähigkeit, Füllfähigkeit und der Ausbreitgeschwindigkeit von selbstverdichtendem Beton, sofern keine Hindernisse vorhanden sind. Für den Setzfließversuch nach E DIN EN 12350-8 wird ein Konus nach DIN EN 12350-2 auf einen mattfeuchten Ausbreittisch (mindestens 900 x 900 mm) gestellt und mit Beton gefüllt. Nach dem Ziehen des Trichters fließt der Beton frei nur unter dem Einfluss der Schwerkraft. Gemessen wird der größte Ausbreitdurchmesser  $d$  und als Setzfließmaß ohne Blockierring ( $SF$ ) angegeben (Bild 11).

Das Verfahren zeichnet sich durch seine einfache Handhabung aus und ist daher sowohl für Labor- als auch für Baustellenuntersuchungen geeignet. Nach E DIN EN 206-9 wird selbstverdichtender Beton in folgende Klassen für das Setzfließmaß eingestuft (Tabelle 2):



Bild 11: Bestimmen des Setzfließmaßes  $SF$  [Lit 12]

Tabelle 2: Setzfließmaßklassen [Lit 10]

Klasse	Setzfließmaß $SF$ [mm] <sup>1) 2)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
SF1	550 bis 650
SF2	660 bis 750
SF3	760 bis 850

<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Klasse des Setzfließmaßes kann durch einen Zielwert ersetzt werden.  
<sup>2)</sup> Die Festlegung gilt nicht für Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung über 40 mm.

Mit Hilfe des Setzfließversuchs kann gut der Zusammenhalt des SVB während des Fließvorgangs überprüft werden (Bild 12 links). Der Zementleim/-mörtel kann sich beim Fließen von grobkörnigen Gesteinskörnungen separieren, wobei sich ein Ring aus Leim/Mörtel bildet (Bild 12 rechts). Entmischte grobkörnige Gesteinskörnungen können auch im Mittelbereich beobachtet werden.

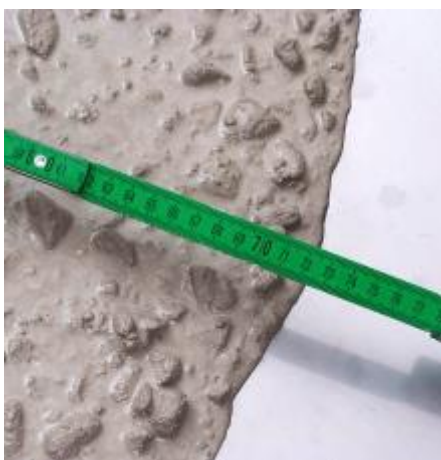


Bild 12: SVB mit gutem Zusammenhalt (links) und abgesetzter Körnung sowie Ring aus Leim/Mörtel (rechts) [Lit 12]

Das Setzfließmaß bezieht sich auf die Fließfähigkeit und die Füllfähigkeit für beliebige Einbausituationen; in der Regel wird das Setzfließmaß festgelegt. Die Prüfung eignet sich nicht für selbstverdichtende Betone, deren Größtkorn der Gesteinskörnung mehr als 40 mm beträgt. Typische Zuordnungen der Klassen des Setzfließmaßes für eine Reihe von Anwendungen sind nachstehend aufgeführt [Lit 10]:

- SF1 eignet sich oft für:
  - nicht bewehrte oder leicht bewehrte Betonbauteile, bei denen die Betoneinbringung von oben erfolgt; der Beton kann sich von der Einbringungsstelle ungehindert ausbreiten (z. B. Wandplatten);
  - Betoneinbringung mittels Pumpen (Tunnelauskleidungen);
  - Bauteile, bei denen Engstellen ein langes horizontales Fließen verhindern (Pfähle und einige tiefe Gründungen);
- SF2 eignet sich für viele übliche Anwendungen (z. B. Wände, Stützen, usw.);
- SF3 wird üblicherweise mit einem kleinen Größtkorn der Gesteinskörnung (< 16 mm) hergestellt. Diese Klasse wird für vertikale Bauteile mit sehr dichter Bewehrung, für Bauteile mit komplexen Formen oder für Bauteile mit oben liegender Schalung verwendet. In üblichen vertikalen Anwendungen ergibt SF3 oft eine bessere Oberflächenbeschaffenheit als SF2, die Sedimentationsstabilität lässt sich jedoch schwerer kontrollieren.

In einigen besonderen Fällen können Zielwerte über 800 mm festgelegt werden. Es sollte jedoch große Sorgfalt angewendet werden, um eine Entmischung zu vermeiden. Das Größtkorn der Gesteinskörnung sollte in diesem Fall unter 12 mm liegen.

### **3.4.2 Prüfung der Viskosität von selbstverdichtendem Betons**

SVB mit niedriger Viskosität fließt anfangs sehr schnell, hört dann aber zu fließen auf. SVB mit hoher Viskosität kann über einen längeren Zeitraum „weiterkriechen“. Die Viskosität kann entweder durch das Bestimmen der  $t_{500}$ -Zeit (während des Setzfließversuches) oder durch das Bestimmen der Auslauftrichterzeit  $t_v$  beurteilt werden.

#### **3.4.2.1 Setzfließversuch (Slump-Flow-Test)**

Mit dem Setzfließversuch (Slump-Flow-Test) kann zusätzlich zum Setzfließmaß  $SF$  die Zeit  $t_{500}$  bestimmt werden, die der fließende Beton benötigt, um einen Durchmesser von 500 mm zu erreichen (Bild 13). Diese ist ein Maß für die Ausbreitgeschwindigkeit und gibt die relative Viskosität des selbstverdichtenden Betons an (vgl. Kapitel 3.4.1).



Bild 13: Bestimmen von der Zeit  $t_{500}$  im Setzfließversuch [Lit 12]

Nach E DIN EN 206-9 wird selbstverdichtender Beton in folgende Viskositätsklassen anhand der  $t_{500}$ -Zeit eingestuft (Tabelle 3):

Tabelle 3: Viskositätsklassen –  $t_{500}$ -Zeit [Lit 10]

Klasse	$t_{500}$ [s] <sup>1) 2)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
VS1	$\leq 2$
VS2	3 bis 6
VS3	$> 6$

<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Viskositätsklasse kann durch einen Zielwert ersetzt werden.  
<sup>2)</sup> Die Festlegung gilt nicht für Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung über 40 mm.

### 3.4.2.2 Trichterauslaufversuch (V-Funnel-Test)

Zur Beurteilung der Viskosität des zu untersuchenden Betons wird ein V-förmiger Auslauftrichter gemäß E DIN EN 12350-9 verwendet (Bild 14). Der Trichter wird bis zum Rand gefüllt und anschließend die Zeitdauer  $t_V$  in Sekunden ermittelt, die der Beton benötigt, um aus dem Trichter auszulaufen. Die Auslaufzeit steigt mit zunehmender Viskosität. Für eine gute Verarbeitbarkeit sollte eine Auslauftrichterzeit im Bereich von 5 bis 15 s angestrebt werden.

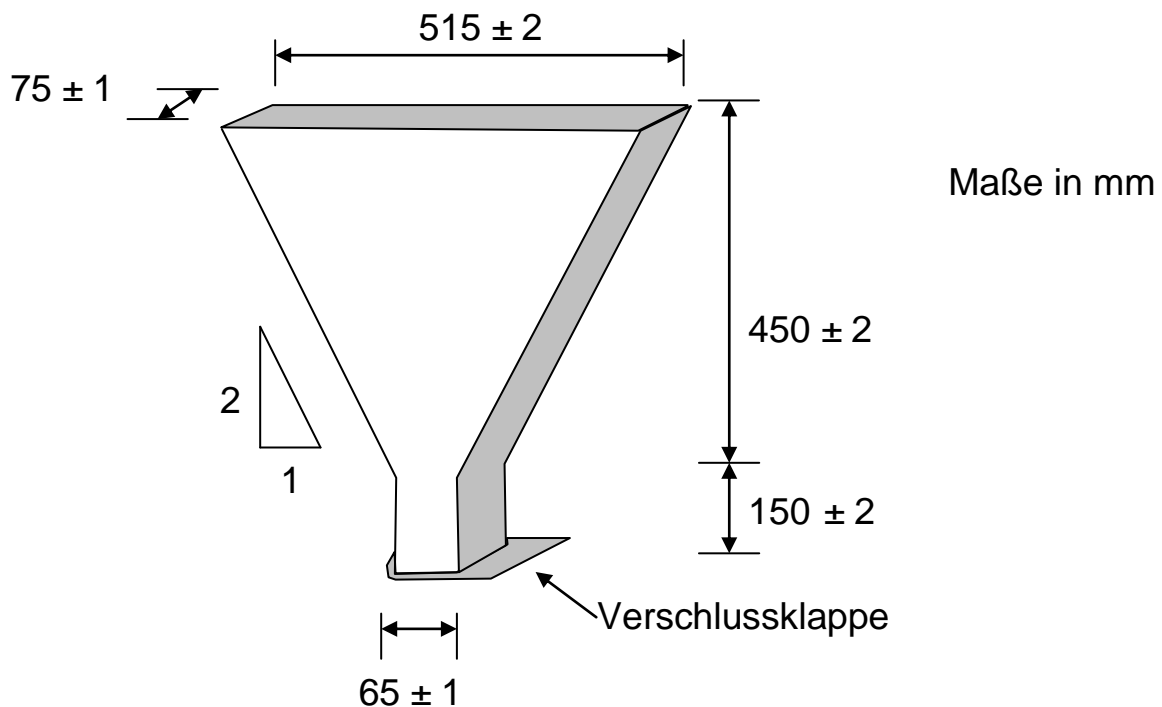


Bild 14: Trichter für den Auslaufversuch

Der Auslauftrichter-Versuch eignet sich nicht für SVB mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung größer als 22,4 mm.

Tabelle 4: Viskositätsklassen – Auslauftrichterzeit [Lit 10]

Klasse	Auslauftrichterzeit [s] <sup>1) 2)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
VF1	< 9
VF2	9 bis 25

<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Viskositätsklasse kann durch einen Zielwert ersetzt werden.  
<sup>2)</sup> Die Festlegung gilt nicht für Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung über 22,4 mm.

### 3.4.2.3 Beurteilung der Viskosität [Lit 10]

Die Viskosität (ob niedrig oder hoch) sollte nur in speziellen Fällen festgelegt werden. Es kann jedoch nützlich sein, während des Setzfließversuches die  $t_{500}$ -Zeit zu bestimmen, um die Einheitlichkeit des SVB in den verschiedenen Chargen zu bestätigen.

- VS1/VF1 weist eine gute Füllfähigkeit auf, auch bei dichter Bewehrung. Selbstverdichtender Beton dieser Klasse ergibt in der Regel die beste Oberflächenbeschaffenheit. Die Gefahr der Wasserabsonderung und des Entmischens ist jedoch höher.
- VS2/VF2 kann eher zur thixotropen Gelbildung neigen, was zur Beschränkung des Schalungsdruckes oder für einen erhöhten Widerstand gegen das Entmischen von Vorteil sein kann. Negative Auswirkungen können auftreten in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit (Lufteinschlüsse), das Ausfüllen von Ecken in Verbindung mit der Klasse SF1 und Stopper beim Pumpen oder Verzögerungen zwischen einzelnen Betonierabschnitten.
- VS3 ist für besondere Fälle geeignet.

### 3.4.3 Durchgangsfähigkeit (passing ability) von selbstverdichtendem Beton

Die Durchgangsfähigkeit bezeichnet die Fähigkeit des Frischbetons, ohne Verlust der Gleichmäßigkeit und blockierfrei durch enge Bereiche und schmale Öffnungen wie z. B. durch Bereiche mit dichter Bewehrung zu fließen. Beim Definieren der Durchgangsfähigkeit ist es notwendig, die Geometrie der Bewehrung zu beachten.

#### 3.4.3.1 Setzfließversuch mit Blockierring (J-Ring-Test)

Der Blockierring-Versuch wird zur Bewertung des Fließvermögens von selbstverdichtendem Beton beim Fließen durch enge Öffnungen einschließlich der Zwischenräume zwischen Bewehrungsstäben bzw. zwischen anderen Hindernissen ohne Entmischung oder Verstopfen angewendet. Diese Prüfung kann mit engen und breiten Stababständen erfolgen. Der enge Stababstand simuliert eher verstopfte Bewehrungen.

Der Blockierring-Versuch ist eine Alternative zum L-Kasten-Versuch (siehe Kapitel 3.4.3.2) nach DIN EN 12350-10, obwohl das Ergebnis nicht direkt vergleichbar ist. Das Verfahren entspricht dem, das in EN 12350-8 zur Bestimmung des Setzfließmaßes und der Zeit  $t_{500}$  für selbstverdichtenden Beton angegeben ist, mit der Ausnahme, dass der Blockierring konzentrisch über dem Setzkegel angeordnet wird, bevor dieser mit Beton gefüllt wird. Der Blockierring besteht aus einem Ring ( $d = 300$  mm), der gleichmäßig verteilte, vertikale, glatte Stäbe ( $\varnothing 18$  mm) enthält.

Für die Beurteilung der Blockierneigung werden die Höhendifferenzen (Bild 15) zwischen der Oberseite des Blockierrings und der Betonoberfläche im Mittelpunkt des Blockierrings  $\Delta h_0$  und an den vier Positionen außerhalb des Blockierrings, d. h. zwei  $\Delta h_{x1}$ ,  $\Delta h_{x2}$  in x-Richtung und die anderen zwei  $\Delta h_{y1}$ ,  $\Delta h_{y2}$  in y-Richtung (senkrecht zu x) gemessen. Mit diesen Werten wird die Blockierstufe  $B_J$  des Blockierrings berechnet:

$$B_J = \frac{(\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2})}{4} - \Delta h_0$$

Dabei sind

$B_J$  die Blockierstufe [mm] und

$\Delta h_i$  die Messhöhen [mm].

Zusätzlich kann das Setzfließmaß im Blockierring-Versuch  $SF_J$  und die Dauer  $t_{500J}$  bis zum Erreichen eines Ausbreitdurchmessers des Betonkuchens von 500 mm ermittelt werden.

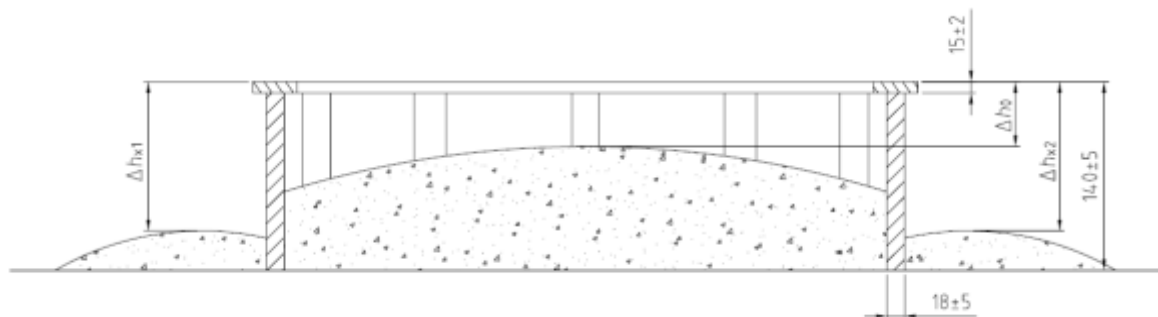


Bild 15: Schnitt durch den mit Beton gefüllten Blockierring [Lit 12]

Durch die gewonnenen Kenndaten  $B_J$ ,  $SF_J$  und  $t_{500J}$  sowie eine optische Begutachtung lässt sich neben der Fließfähigkeit zusätzlich eine Aussage über die Blockierneigung des Betons ableiten.  $B_J$  wird für die Einstufung in eine Blockierneigungsklasse PJ genutzt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Blockierneigungsklassen – Blockierring-Versuch [Lit 10]

Klasse	Blockierring Absatz $B_J$ [mm] <sup>1) 2)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
PJ1	$\leq 10$ mit 12 Bewehrungsstäben
PJ2	$\leq 10$ mit 16 Bewehrungsstäben
<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Klasse der Durchgangsfähigkeit kann durch die Angabe eines anderen oberen Grenzwertes ersetzt werden. <sup>2)</sup> Die Festlegung gilt nicht für Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung über 40 mm.	

### 3.4.3.2 L-Kasten-Versuch (L-Box-Test)

Der L-Kasten-Versuch nach DIN EN 12350-10 wird zur Bewertung des Fließvermögens von selbstverdichtendem Beton beim Fließen durch enge Öffnungen einschließlich der Zwischenräume zwischen Bewehrungsstäben und anderen Hindernissen ohne Entmischung oder Verstopfen verwendet. Es gibt zwei Varianten; die Prüfung mit zwei Stäben und die Prüfung mit drei Stäben. Die Prüfung mit drei Stäben simuliert eine eher verstopfte Bewehrung.

Im Versuch fließt ein abgemessenes Frischbetonvolumen horizontal durch die Zwischenräume zwischen vertikalen, glatten Bewehrungsstäben (Bild 16). Die Höhe des Betons hinter den Stäben und am Ende des L-Kastens wird gemessen und das Verhältnis bestimmt. Dadurch wird das Abschätzen des Fließvermögens  $PA$  (passing ability ratio) und der Blockierneigung von selbstverdichtendem Beton ermöglicht.  $PA$  wird für die Einstufung in eine Blockierneigungsklasse PL genutzt (Tabelle 6).

$$PA = \frac{H_2}{H_1}$$

**Detail:**

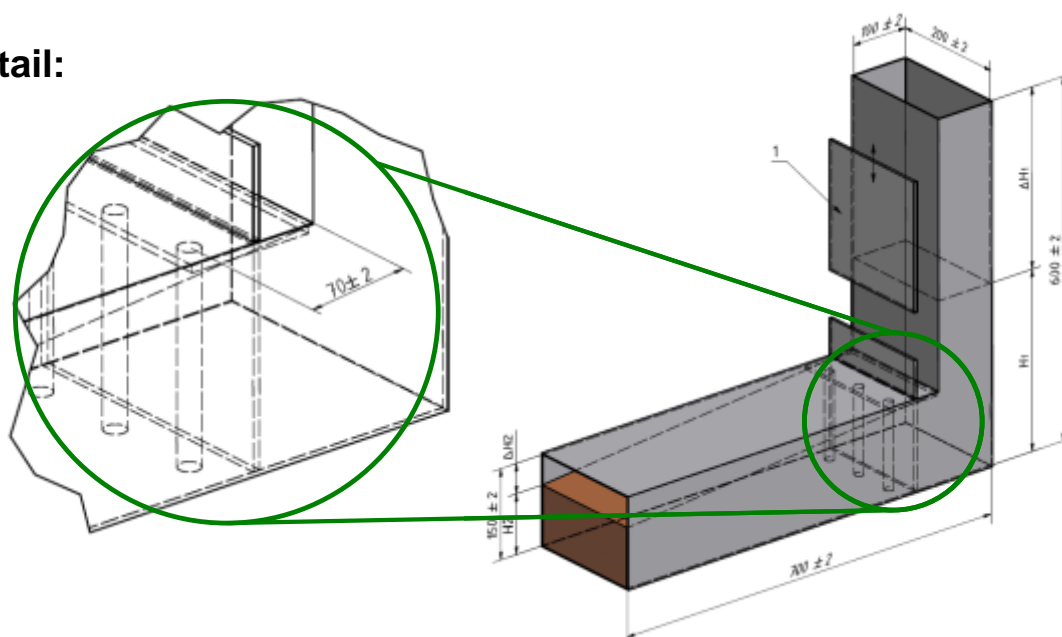


Bild 16: Aufbau des L-Kastens mit den erforderlichen Maßen [Lit 12]

Tabelle 6: Blockierneigungsklassen – L-Kasten-Versuch [Lit 10]

Klasse	L-Kasten-Wert [-] <sup>1)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
PL1	≥ 0,80 mit 2 Bewehrungsstäben
PL2	≥ 0,80 mit 3 Bewehrungsstäben
<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Klasse der Durchgangsfähigkeit kann durch die Angabe eines anderen unteren Grenzwertes ersetzt werden.	

### 3.4.3.3 Beurteilung der Durchgangsfähigkeit [Lit 10]

Die für die Beurteilung der Durchgangsfähigkeit maßgebliche Abmessung ist die kleinste Öffnung (bzw. der kleinste Spalt), durch die (den) der SVB kontinuierlich fließen muss, um die Schalung auszufüllen. Diese Öffnung bzw. dieser Spalt wird nachstehend als „Durchflussöffnung“ bezeichnet. Mit Ausnahme von dichter Bewehrung wird die Betondeckung in der Regel nicht berücksichtigt, da der SVB die Stäbe umfließen kann und nicht kontinuierlich durch die Durchflussöffnungen fließen muss.

Beispiele zur Festlegung der Blockierneigung sind:

- PL1 oder PJ1: für Bauteile mit Durchflussöffnungen zwischen 80 mm und 100 mm (typisch für vertikale Bauteile im Wohnungsbau);
- PL2 oder PJ2: für Bauteile mit Durchflussöffnungen zwischen 60 mm und 80 mm (typisch für Ingenieurbauwerke)

Für dünne Platten, in denen die Durchflussöffnung größer als 80 mm ist, und für andere Bauteile, in denen die Durchflussöffnung größer als 100 mm ist, ist es nicht notwendig, die Durchgangsfähigkeit festzulegen.

Für komplexe Bauteile mit Durchflussöffnungen kleiner als 60 mm kann es notwendig sein, spezielle Modellversuche durchzuführen.

## 3.4.4 Sedimentationsstabilität (Segregation Resistance) von SVB

### 3.4.4.1 Siebversuch (Sieve segregation test)

Der Siebversuch nach DIN EN 12250-11 wird zur Bewertung der Sedimentationsstabilität von selbstverdichtendem Beton verwendet.

Nach der Probenahme ruht der Frischbeton zunächst 15 min lang. Jegliche Absonderung von Wasser in dieser Zeit wird aufgezeichnet. Ein festgelegter oberer Bereich der Probe wird dann auf ein Sieb mit quadratischen, 5 mm großen Öffnungen gegeben. Nach zwei Minuten wird die Masse des Materials, das durch das Sieb gelaufen ist, aufgezeichnet. Die Entmischung wird dann als das Verhältnis von Siebdurchgangsmenge zu Probemenge berechnet.



Tabelle 7: Sedimentationsstabilitätsklasse [Lit 10]

Klasse	Sedimentierter Anteil [%] <sup>1) 2)</sup> (Grenzwert für individuelle Chargen)
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15
<sup>1)</sup> Die Festlegung einer Klasse des Entmischungswiderstands kann durch die Angabe eines anderen oberen Grenzwertes ersetzt werden. <sup>2)</sup> Die Festlegung gilt nicht für Beton mit Fasern oder leichten Gesteinskörnungen.	

### 3.4.4.2 Beurteilung der Sedimentationsstabilität [Lit 10]

Der Sedimentationsstabilität beschreibt den Entmischungswiderstand und ist eine grundlegende Voraussetzung für die Homogenität und Qualität von selbstverdichtendem Beton auf der Baustelle.

Im selbstverdichtenden Beton kann während des Einbaus eine dynamische Entmischung und nach dem Einbau – jedoch vor dem Erhärten – eine statische Entmischung stattfinden. Die statische Entmischung ist vor allem für hohe Bauteile nachteilig. Aber auch in dünnen Platten kann sie zu Oberflächenfehler wie z. B. Rissbildung oder einer schlechten Oberflächenqualität führen.

Die Prüfung der Sedimentationsstabilität eignet sich nicht für Faser- und Leichtbeton.

Für den Fall, dass entsprechende Erfahrungen fehlen, werden die folgenden allgemeinen Hinweise zu den Stabilitätsklassen gegeben:

Die Stabilität ist ein wichtiger Parameter bei höheren Klassen des Setzfließmaßes bzw. bei niedrigeren Viskositätsklassen. Wenn keine dieser Voraussetzungen zutrifft, ist es in der Regel nicht notwendig, eine Stabilitätsklasse festzulegen.

- SR1 eignet sich in der Regel für dünne Platten und für vertikale Anwendungen mit einem Fließweg von maximal 5 m und Durchflussöffnungen größer als 80 mm.
- SR2 ist für vertikale Anwendungen mit einem Fließweg größer als 5 m und Durchflussöffnungen größer als 80 mm besser geeignet, um die Gefahr der dynamischen Entmischung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Falls die Festigkeit und Qualität der Oberfläche besonders kritisch sind, darf SR2 oder ein Zielwert festgelegt werden.  
SR2 eignet sich auch für vertikale Anwendungen mit Durchflussöffnungen bis 80 mm, vorausgesetzt, die Bauteilhöhe weniger als 5 m beträgt. Wenn jedoch der maximale Fließweg mehr als 5 m beträgt, sollte ein Zielwert von weniger als 10 % festgelegt werden.

### 3.4.5 Luftgehalt und Frischbetonrohichte

Der Luftgehalt und die Frischbetonrohichte des selbstverdichtender Betone können in Anlehnung an DIN EN 12350-7 und DIN EN 12350-6 ermittelt werden. Abweichend von diesen Normen erfolgt die Befüllung des Prüfgerätes bei den selbstverdichtenden Betonen über eine 1 m lange und um 20 ° geneigte Rinne. Die selbstverdichtenden Betone werden anschließend nicht durch äußere Energiezufuhr verdichtet.

### 3.4.6 Nicht genormte Verfahren zur Beurteilung von SVB

Im Zuge der Entwicklung und Markteinführung der selbstverdichtenden Betone wurden zahlreiche Verfahren entwickelt, um die Frischbetoneigenschaften zu beurteilen.

#### 3.4.6.1 U-Kasten-Versuch (U-Box-Test) [Lit 20]

Mit dieser Prüfung wird die Fähigkeit des Betons sich auszunivellieren und seine Neigung zum Blockieren untersucht. Zur Prüfung wird ein Behälter mit zwei Kammern verwendet, die im unteren Teil durch einen Schieber getrennt werden können. Die höhere Kammer wird bei geschlossenem Schieber gefüllt. Anschließend wird der Schieber geöffnet, so dass der Beton durch die Öffnung in die zweite Kammer fließen und dort aufsteigen kann. Im Öffnungsquerschnitt befinden sich je nach Anforderung mehrere Bewehrungsstäbe (Bild 17 links), die in gleichmäßigen Abständen über die Behälterbreite von 200 mm verteilt sind. Der SVB sollte nach dem Überwinden des Bewehrungshindernisses mindestens eine Steighöhe von 300 mm haben; im Idealfall stellt sich ein Niveausgleich ein. Das Verfahren wird sowohl für Labor- als auch für Baustellenuntersuchungen angewendet.

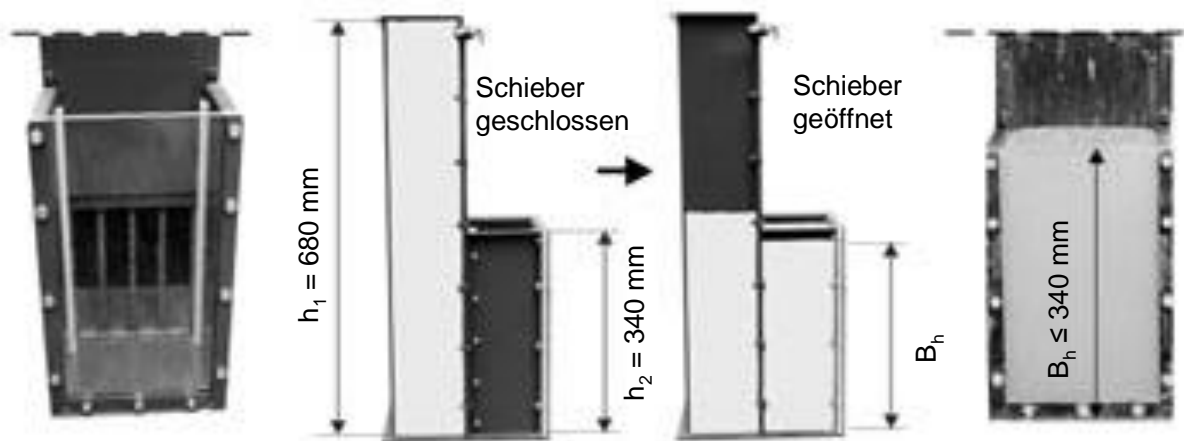


Bild 17: U-Box-Test zur Überprüfung der Einbaubarkeit und des Blockierverhaltens von SVB [Lit 14]

#### 3.4.6.2 Zylinder-Sedimentationsversuch [Lit 20]

Die Prüfung der Zylinder-Sedimentation dient zur Beurteilung, ob der zu verarbeitende Frischbeton stabil ist, d. h. ob die groben Gesteinskörnungen bis zum Ansteifen des Betons gleichmäßig verteilt in ihrer Lage gehalten werden können. Dazu wird nach einer definierten Sedimentationszeit im Ruhezustand der Gehalt der groben Gesteinskörnungen in verschiedenen Höhen bestimmt.

Die Prüfapparatur besteht aus einer 450 mm hohen Zylinderform mit einem Innendurchmesser von 150 mm (Bild 18). Diese Form ist in drei volumengleiche Segmente ( $h_i = 150 \text{ mm}$ ) zerlegbar.



Bild 18: 3-teiliger Sedimentationszylinder (Münchener Variante)

### 3.4.6.3 FIZ-Tauchstabversuch [Lit 14]

Mit Hilfe des am Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) entwickelten Tauchstabverfahren wird die Sedimentationsneigung von SVB ermittelt. Die Sedimentationshöhe  $h_s$  wird definiert als Differenz der Probekörperhöhe  $h_0$  und der Eintauchstrecke  $h_T$  des Tauchstabs und wird in mm angegeben.

Die Sedimentationshöhe wird 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 verharrt dann längere Zeit auf der Sedimentationshöhe (Bild 19). Das Verfahren ist geeignet, zusätzliche Informationen über das Absetzverhalten (zeitlicher Verlauf, kontinuierliches oder plötzliches Absetzen usw.) zu gewinnen. Einen festen Grenzwert liefert dieses Verfahren nicht.

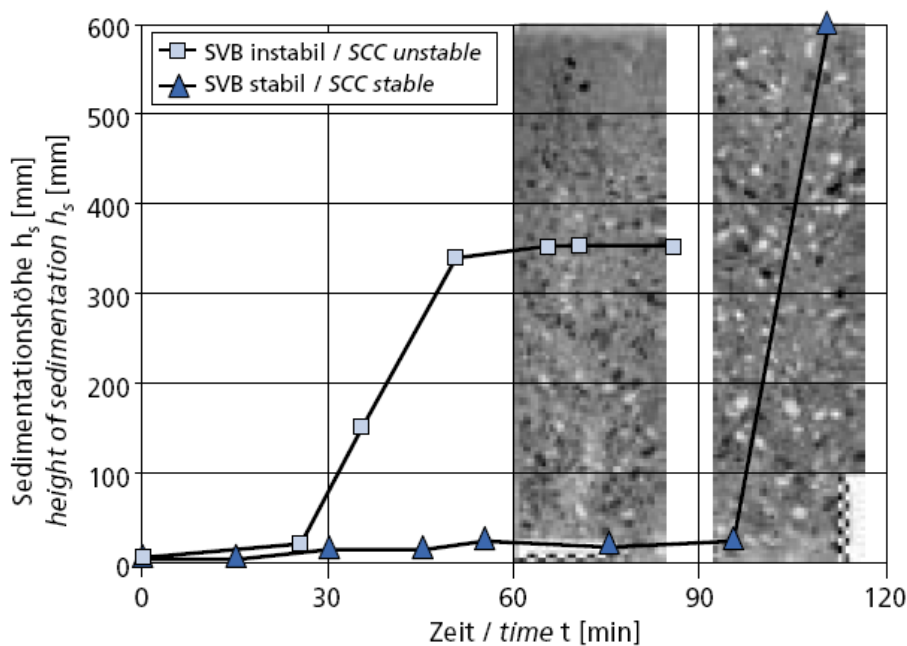


Bild 19: Auswertung des Tauchstabversuchs für instabilen und stabilen SVB [Lit 14]

## **4 Festbetoneigenschaften [Lit 20]**

Zur Beurteilung von Beton werden meist die üblichen Kennwerte der Festbetoneigenschaften, wie z. B. Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul, Schwinden und Kriechen oder der Eindringwiderstand gegen Flüssigkeiten herangezogen. Mit Hilfe dieser Parameter lassen sich mögliche Anwendungsbereiche festlegen und Prognosen über die Dauerhaftigkeit der in diesen Anwendungsbereichen verwendeten Betone erstellen

Bei jedem neuen Werkstoff stellt sich dabei das Problem, dass zu Beginn der Entwicklung nur das Kurzzeitverhalten getestet werden kann. Wissen über das Verhalten nach z. B. 20 Jahren und mehr fehlt gänzlich.

### **4.1 Herstellung der Probekörper für Festbetonuntersuchungen [Lit 3]**

Die Probekörper für das Bestimmen der Festbetoneigenschaften werden gemäß DIN EN 12390-2 mit folgenden Abweichungen hergestellt:

- Die Probekörper werden nicht verdichtet.
- Die Probekörper-Formen dürfen nach dem Befüllen mit selbstverdichtendem Beton solange keiner Erschütterung ausgesetzt werden, bis der Beton soweit angesteift ist, dass ein Entmischen durch Absinken der Gesteinskörnung nicht mehr stattfindet.

### **4.2 Druckfestigkeit [Lit 20]**

Die Druckfestigkeit von SVB entspricht der Festigkeit, die unter Beachtung der bekannten Zusammenhänge über w/b-Wert und der Normfestigkeit des Zements auch von Rüttelbeton zu erwarten ist.

Werden puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe zugegeben, ist es wahrscheinlich, dass die Druckfestigkeit über der Festigkeit liegt, die aufgrund des anrechenbaren w/z-Wertes und der Zementfestigkeitsklasse vorhergesagt wird. Dies gilt insbesondere für die Nacherhärtung, die unter Umständen beträchtlich sein kann. SVB kann Festigkeiten von 70 N/mm<sup>2</sup> und mehr erreichen.

Mit SVB, dem Silicastaub zugegeben wurde, können auch Festigkeiten erzielt werden, die eine Einordnung als hochfester Beton ermöglichen. Da der Wassergehalt der Mischung nur in engen Grenzen veränderbar ist (Beibehaltung der Fließeigenschaften), muss die Verringerung des w/b-Wertes durch eine Erhöhung des Zements- bzw. Bindemittelgehaltes vorgenommen werden.

### **4.3 Zugfestigkeit [Lit 20]**

Über die Zugfestigkeit von SVB sind noch keine systematischen Untersuchungen bekannt geworden, die Ergebnisse widersprechen sich auch teilweise. Einige Untersuchungen belegen, dass die Spaltzugfestigkeit von SVB ca. 8 bis 10 % der Druckfestigkeit des SVB beträgt (Verhalten analog zu Rüttelbeton). Andere Untersuchungen ergaben Spaltzugfestigkeit von 10 bis 15 % der Druckfestigkeit. Die in der Tendenz höhere Spaltzugfestigkeit des SVB gegenüber Rüttelbeton wird mit einer weniger gestörten Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung begründet.

### **4.4 Elastizitätsmodul [Lit 20]**

Der E-Modul von Beton hängt ab von dem E-Modul der Gesteinskörnung, von dem E-Modul des Zementsteins sowie deren Volumenanteile. Im Vergleich zu Rüttelbeton wird SVB mit einem erhöhten Anteil an Leim und einen geringen Gesteinskörnungsgehalt hergestellt.

Deswegen ist bei gleicher Festigkeit des Zementsteins beim SVB ein niedrigerer E-Modul zu erwarten als bei Rüttelbeton.

Untersuchungen mit SVB nach dem Mehlkorntyp zeigten E-Modul-Werte, die um ca. 5 bis 20 % unterhalb denen des Rüttelbetons lagen. Bei anderen Untersuchungen konnte kein geringerer E-Modul bei SVB gegenüber Rüttelbeton beobachtet werden.

#### 4.5 Verbundfestigkeit [Lit 20]

Die Verbundfestigkeit wird durch die Lage und Neigung der Bewehrung während des Betoniervorganges und durch die Schütthöhe des überdeckten Betons beeinflusst. Diesem Umstand wird in DIN 1045-1 [Lit 5] durch eine Unterteilung in Bereiche mit „gutem“ und „mäßigen“ Verbundbedingungen bei der Bemessung Rechnung getragen. Bei SVB ist diese Abhängigkeit der Verbundwirkung von der Betonierlage nicht erkennbar. Bild 20 zeigt, dass das Verbundverhalten bei SVB weitgehend unabhängig von der Bewehrungslage ist und die Verbundwirkung im Bereich zwischen „unten liegender“ Bewehrung und „oben liegender“ Bewehrung einzuordnen ist. Als Grund hierfür wird das geringere Absetzverhalten des SVB und die gleichmäßigere Struktur der Bindemittelmatrix genannt. Die Abnahme der bezogenen Verbundspannung von SVB gegenüber unten liegender Bewehrung bei Rüttelbeton beträgt ca. 25 %. Die Gründe hierfür sind eine durch den erhöhten Mehlkorngelalt bewirkte andere Kraftübertragung zwischen Bewehrungsstab und umhüllendem Beton und möglicherweise auch Luftporen, die sich an den Grenzflächen zwischen der Bewehrung und der Matrix ansammeln.

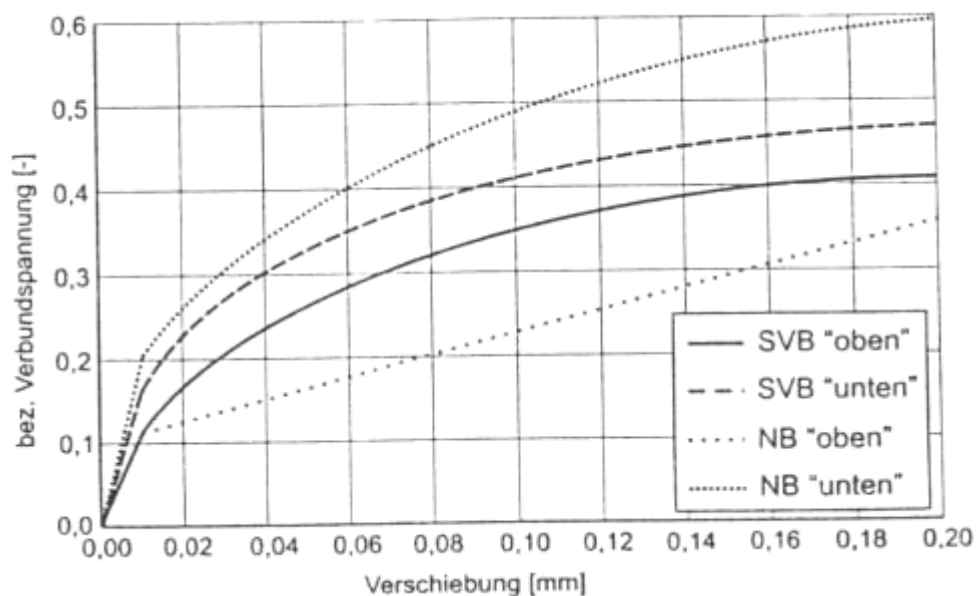


Bild 20: Mittelwerte der Verbundspannung-Verschiebungs-Beziehung von unten liegenden und oben liegenden Bewehrungsstäben in Normalbeton und SVB [Lit 19]

#### 4.6 Schwinden [Lit 20]

Das Schwindverhalten von SVB wird in erster Linie von dessen Zusammensetzung beeinflusst. Dabei spielt das Volumen an schwindfähigem Material (Zementstein) sowie die Festigkeit der Matrix eine wichtige Rolle. Ein hoher Zementsteinanteil erhöht unter sonst gleichen Bedingungen das Schwindmaß. Da SVB weniger Gehalt an Gesteinskörnung hat als Rüttelbeton, werden die Schwindverformungen bei SVB tendenziell größer sein als bei Normalbeton. Bei SVB mit geringem Grobkornanteil ist zudem eine Reduzierung der

schwindbehindernden Wirkung durch das Korngerüst mit in Betracht zu ziehen. Auch Betonzusatzmittel können das Schwindmaß teilweise erheblich erhöhen.

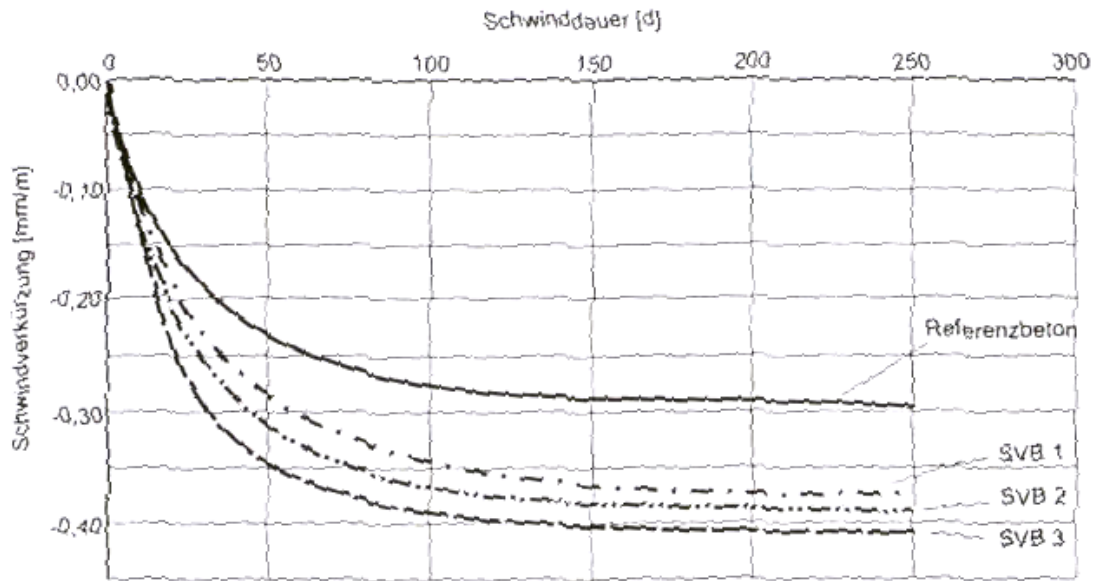


Bild 21: Schwindverformungen von SVB und Rüttelbeton

#### 4.7 Kriechen [Lit 20]

Das Kriechen des Betons wird weitestgehend durch das Kriechen des Zementsteins verursacht. Die Kriechverformungen werden bei sonst gleichen Bedingungen demnach um so größer, je größer das Volumen des Zementsteins bzw. je geringer der Gehalt an Gesteinskörnung ist. Dieses Verhalten ist in jungem Betonalter ausgeprägter als bei älterem Beton. Einige Untersuchungen zeigten ein um rd. 10 % höheres Kriechen bei SVB gegenüber Normalbeton.

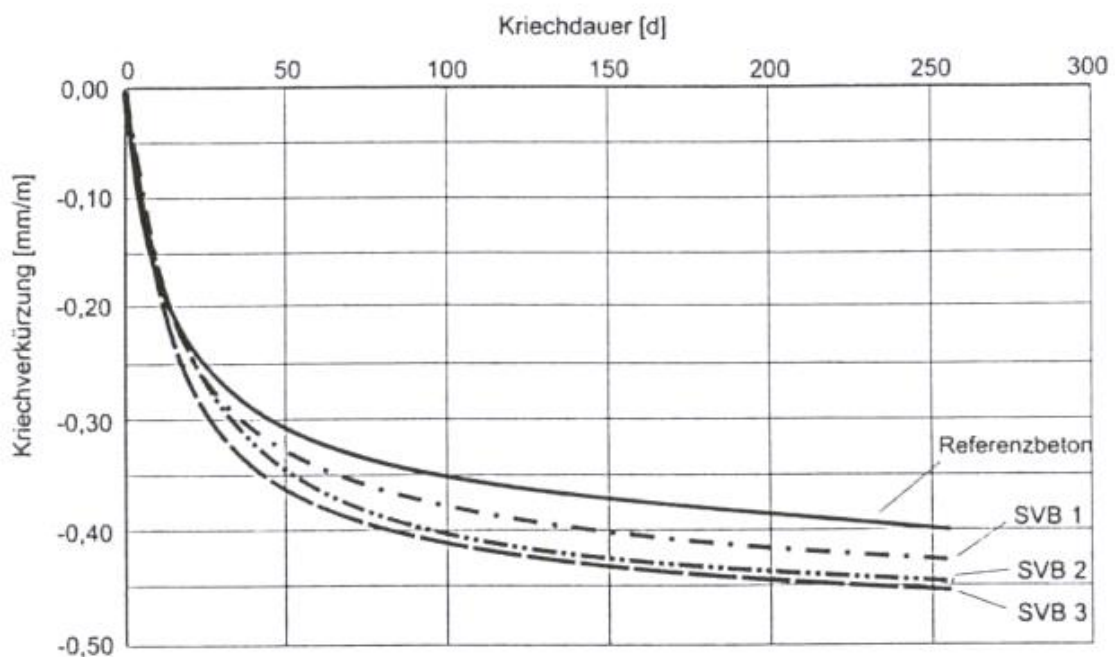


Bild 22: Kriechen von SVB und Rüttelbeton

#### 4.8 Spannungs-Dehnungs-Linie [Lit 20]

Vergleichende Untersuchungen der Spannungs-Dehnungs-Linien von SVB und Rüttelbeton zeigten, dass sich SVB im ansteigenden Ast verhält wie der normale Rüttelbeton. Der abfallende Ast der Spannungs-Dehnungs-Linie fällt steiler ab. Dieses Verhalten lässt sich mit der geringeren Kornverzahnung im Bereich der Risse erklären. Das Bruchverhalten sowie das Verformungsverhalten im abfallenden Ast von SVB zeigen Ähnlichkeiten mit hochfestem Beton.

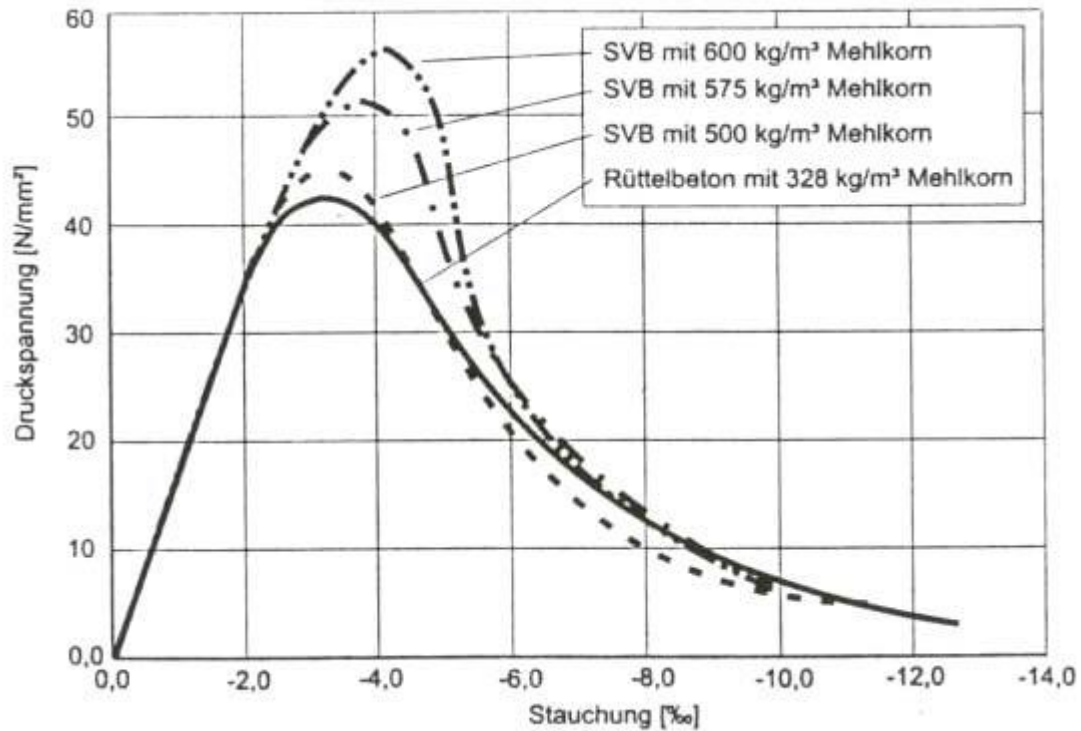


Bild 23: Spannungs-Dehnungs-Linien von SVB und Rüttelbeton

## 5 Herstellung, Transport und Einbau

### 5.1 Mischen und Transportieren

Die Anforderungen an die Dosiergenauigkeit der Mischanlage sind hoch, weil selbstverdichtender Normalbeton viel empfindlicher auf Veränderungen der Eigenschaften seiner Ausgangsstoffe reagiert als die bei normalem Rüttelbeton der Fall ist (Bild 24).

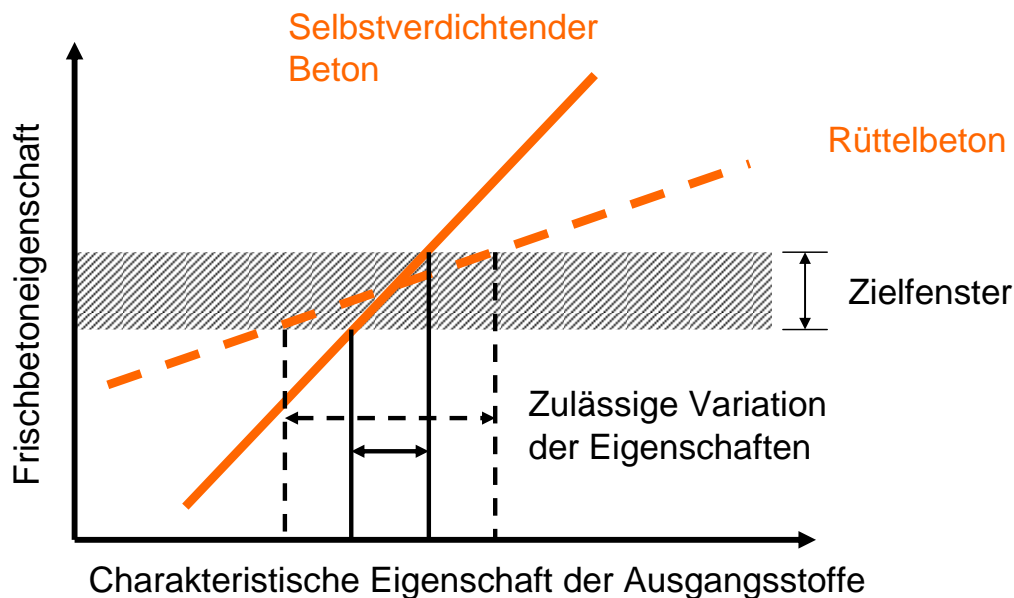


Bild 24: Einfluss veränderter Materialeigenschaften auf die Frischbetoneigenschaften

Restwasser darf nur unter bestimmten Voraussetzungen verwendet werden, da es sich durch seinen hohen Feststoffgehalt nachteilig auswirken könnte [Lit 25].

Unterschiedlich lange Transportzeiten können die Konsistenz des selbstverdichtenden Betons beeinflussen, da unter Umständen bei einigen Fließmitteln durch das Mischen im Fahrמיшcher eine zusätzliche verflüssigende Wirkung eintritt, der als Depoteffekt bezeichnet wird und später zum Entmischen führen kann. Ein Nachdosieren von Fließmittel auf der Baustelle ist möglich, wenn eine Dosieranleitung vorliegt und das Nachdosieren im Rahmen der Eignungsprüfung untersucht wurde [Lit 25].

Auf der Baustelle ist die Lieferung jedes Transportbetonfahrzeugs einer Annahmeprüfung zu unterziehen, da SVB sehr empfindlich ist. Als einfache Annahmeprüfung eignet sich das Setzfließmaß mit oder ohne Blockierring sowie die Kontrolle der Auslaufrichterzeit [Lit 25].

### 5.2 Einbau von SVB [Lit 25]

Wenn der SVB nicht kontinuierlich eingebracht wird, neigt er dazu, an der Oberfläche eine zusammenhängende Bindemittelschicht – die sogenannte Elefantenhaut – auszubilden. Sie wirkt wie eine Trennschicht für den nachfolgenden Beton und zeichnet sich auf der fertigen Oberfläche ab.

Selbstverdichtender Beton benötigt für das Entlüften einen ausreichenden Fließweg. Ist diese Möglichkeit nicht im Bauteil gegeben, muss sie in Ausnahmefällen künstlich z. B. durch den Einsatz von Fließrinnen geschaffen werden. Der Entlüftungsvorgang wird unterstützt, wenn der SVB über eine Kante ablaufen kann, bevor er an die vorgesehene Einbaustelle gelangt. Besonders kritisch sind schlanke Stützen und unterschrittene Schalungen, die ein



selbstständiges Entlüften erschweren. Durch kurze Fließwege und hohe Betoniergeschwindigkeiten reicht die Auftriebskraft der Luftporen nicht, um die darüber befindliche Frischbetonschicht zu durchdringen. Zur Abhilfe sollte ein unnötiger Lufteintrag von vornherein vermieden werden. Dazu ist zum Beispiel das Ende des Pumpenschlauchs ständig in den Frischbeton eingetaucht zu halten. Dies verhindert auch das Ausbilden einer Trennschicht (s. o.). Eine mögliche Abhilfe ist das Einpumpen des Beton von unten in die Schalung durch Einfüllstutzen (Bild 25).



Bild 25: Einfüllstutzen für SVB [Lit 9]

### **5.3 Schalungsdruck [Lit 24]**

Eine Abschätzung des Schalungsdruckes für SVB mit dem Bemessungsdiagramm nach DIN 18218 ist nur eingeschränkt möglich, weil der Schalungsdruck von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Diese sind auch bei der Bestimmung des Schalungsdruckes von Rüttelbeton noch nicht ausreichend geklärt. Im Falle des SVB sind dies im Wesentlichen die sehr unterschiedliche Rheologie und das Einbringverfahren. In den Fällen, in denen die Randbedingungen nicht eindeutig im Zuge der Arbeitsvorbereitung festgelegt werden können, sollte daher der hydrostatische Druck zur Bemessung der Ankerkräfte gewählt werden.

### **5.4 Nachbehandlung**

Das Herstellen der fertigen Betonoberfläche sollte möglichst unmittelbar nach Erreichen der endgültigen Betonhöhe erfolgen, da das thixotrope Verhalten des selbstverdichtenden Betons und das Ausbilden der Elefantenhaut ein Nacharbeiten erschweren. Das Nivellieren horizontaler Flächen erfolgt am einfachsten unter leichtem Wabbeln mit Abziehbrettern (Bild 26).

Für das Herstellen der endgültigen Oberflächen können leichte stählerne Rüttelbohlen eingesetzt werden, sofern nicht die Gefahr des Entmischens besteht. Ab einer Oberflächenneigung von 2 bis 3 % besteht beim Einsatz von Rüttelbohlen die Gefahr, dass der frische SVB wieder ins Fließen gerät [Lit 2].

Sobald die Oberflächen hergestellt sind, ist mit der Nachbehandlung zu beginnen. Da SVB oftmals wegen seiner guten Oberflächenqualität eingesetzt wird, sollte hierbei eine entsprechende Sorgfalt an den Tag gelegt werden.



Bild 26: Nivellieren einer SVB-Oberfläche mit einem leichten Abziehbrett [Lit 2]

### **5.5 Oberflächenqualität**

Im Idealfall spiegelt die Oberfläche eines mit SVB hergestellten Bauteils selbst das kleinste Detail der Schalung wider (Bild 27). Dies wird gern von Architekten für anspruchsvoll gestaltete Oberflächen (z. B. durch Matrizen) genutzt. Andererseits werden auch kleinste Mängel wie Nagellöcher oder Ausbesserungsstellen ebenso genau abgebildet. Der Anspruch an eine hohe Qualität der fertigen Oberfläche geht daher mit einer hohen Anforderung an die Qualität der Schalung einher.



Bild 27: Details an der Oberfläche eines SVB-Fertigteils [Lit 2]

## 6 Selbstverdichtender Leichtbeton

Selbstverdichtender Leichtbeton ist in Deutschland nicht geregelt. Es gab drei inhaltlich übereinstimmende Zulassungen für LC30/33 D1,3, LC30/33 D1,4 und LC35/38 D1,6 die jedoch wegen der darin enthaltenen zahlreichen Auflagen den Einsatz unwirtschaftlich werden ließen. Die Gültigkeit dieser Zulassungen ist inzwischen ausgelaufen. Eine Aufnahme in die Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ wurde wegen fehlender Erfahrungen mit selbstverdichtenden Leichtbetonen abgelehnt.

Selbstverdichtender Leichtbeton erfordert einen hohen Mehlkorngesamt. Die Zugabe eines Stabilisierers ist nicht unbedingt erforderlich.

Tabelle 8: Exemplarische Zusammensetzung Selbstverdichtender Leichtbetone [Lit 16]

	LC30/33 D1,3			LC35/38 D1,6		
	Stoffraum	Rohdichte	Massen trocken	Stoffraum	Rohdichte	Massen trocken
	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Liapor K-Sand 0/2 <sup>1)</sup>	257	1,22	314			
Natursand 0/2 mm				211	2,62	554
Liapor F6.5 2/10 mm <sup>2)</sup>	336	1,19	400	378	1,19	450
Flugasche SAFAMENT	95	2,32	220	96	2,32	223
CEM II/A-LL 42,5 R	109	3,03	330	111	3,03	337
Zugabewasser	164	1,00	164	188	1,00	188
Restporen	40			16		
Summe	1000		1428	1000		1752
Stabilisierer			1,3			1,0
Fließmittel			6,5			3,4

1) Vornässgrad 20 M.-%; 2) Vornässgrad 15 M.-%

Die bisher vorliegende Erkenntnisse zeigen, dass selbstverdichtende Leichtbetone zielsicher hergestellt werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn Leichtsand verwendet wird. Dadurch werden zum einen die Rohdichteunterschiede zwischen den Bestandteilen des Leichtbetons verringert und damit die Entmischungsneigung minimiert. Zum anderen puffert der Leichtsand Unterschiede im Wassergehalt ab und erhöht so die Robustheit des selbstverdichtenden Leichtbetons. Die mechanischen Eigenschaften selbstverdichtender Leichtbetone stimmen mit denen konventioneller Leichtbetone überein [Lit 16].

## 7 Literatur

- Lit 1: BauMineral: Selbstverdichtender Beton (SVB) mit EFA-Füller® als Betonzusatzstoff und Bindemittelkomponente - Berechnungs- und Prüfverfahren zur Betonzusammensetzung selbstverdichtender Betone (SVB). [www.baumineral.de/pdf/Selbst\\_Beton.pdf](http://www.baumineral.de/pdf/Selbst_Beton.pdf), 2010
- Lit 2: BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, EFNARC: The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use. May 2005
- Lit 3: DAfStb: Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Beuth-Verlag, Ausgabe November 2003
- Lit 4: DBV-Merkblatt Selbstverdichtender Beton (SVB). Deutscher Beton- und Bautechnikverein. Fassung Dezember 2004
- Lit 5: DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institut für Normung, 08/2008
- Lit 6: DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Deutsches Institut für Normung, 08/2008
- Lit 7: DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung. Deutsches Institut für Normung, 08/2008
- Lit 8: DIN EN 206-1: Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsches Institut für Normung, 07/2001
- Lit 9: Doka: Hauptbahnhof Innsbruck. [www.doka.com/doka/de\\_global/services/presscorner/pages/00688/index.php](http://www.doka.com/doka/de_global/services/presscorner/pages/00688/index.php), 2003
- Lit 10: E DIN EN 206-9: Beton - Teil 9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB). Deutsches Institut für Normung, 01/2008
- Lit 11: Graubner, C.-A. et al.: Sachstandsbericht „Frischbetondruck fließfähiger Betone“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 567, Beuth-Verlag, 2006
- Lit 12: HeidelbergCement: Frischbetonprüfung. Foliensatz für die Hochschule, 2009
- Lit 13: Jacobs, F.; Hermann, K.: Self-compacting concrete. TFB Cementbulletin, 69. Jahrgang, Januar 2000
- Lit 14: Kordts, S.; Breit, W.: Beurteilung der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Beton Jg. 53, Heft 11, S. 565 – 571, 2003
- Lit 15: Kordts, S.; Grube, H.: Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton. Beton Jg. 52, Heft 4, S.217- – 223, 2002
- Lit 16: MPA Karlsruhe: Prüfbericht Nr. 03 24 69 0279, 2003
- Lit 17: Okamura, H.; Maekawa, K.; Ozawa, K.: High Performance Concrete (Japanisch), Gihodo Shuppan, Tokyo, 1993
- Lit 18: Okamura, H.; Ozawa, K.: Mix-design for self-compacting concrete. Concrete Library of JSCE, No. 25, S. 107 – 120, 1995
- Lit 19: Reinhardt, H.-W. et al.: Sachstandsbericht „Selbstverdichtender Beton“, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 516, Beuth-Verlag, 2001

- Lit 20: Schießl, P.: Selbstverdichtender Beton. Vorlesungsskript zur Grundfachvorlesung des Fachs Baustoffkunde. Technische Universität München, 2005
- Lit 21: Schubert, H.: Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Haufwerken aus körnigen Stoffen, Chemie-Ing.-Techn. 45, No. 6, S. 396–401, 1973
- Lit 22: Spanka, G.; Grube, H.; Thielen, G.: Wirkungsmechanismen verflüssigender Betonzusatzmittel, Beton 45, Heft 11, S. 802–808 und Heft 12, S. 876–881, 1995
- Lit 23: Strobl, Th.: SCC – SVB Selbstverdichtender Beton pannenfrei. [www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/SCC\\_pannenfrei.pdf](http://www.basf-cc.at/de/Service/TechnischeDokumentation/Documents/SCC_pannenfrei.pdf), 2010
- Lit 24: Uebachs, S.; Brameshuber, W.: Schalungsdruck bei dem Einsatz von Selbstverdichtendem Beton. Aus: Aktuelle Forschungsergebnisse Ibac Kurzbericht 108, 2004
- Lit 25: VDZ: Zement-Merkblatt Betontechnik B29: Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung, Düsseldorf, 7.2006