

## **KURZBERICHT**

**F 869**

**Entwicklung von Selbstverdichtenden Betonen  
des Stabilisierertyps zum speziellen Einsatz im  
Wohnungsbau**

**Projekt Nr. Z 6 - 10.07.03-03.19/II 13 – 80 01 03 - 19**

## 1 ZIEL DER FORSCHUNGSAUFGABE

Bei den zur Zeit in Deutschland zum Einsatz kommenden Selbstverdichtenden Betonen (SVB), die auch bereits erfolgreich im Wohnungsbau eingesetzt werden, handelt es sich um Selbstverdichtende Betone des Mehlkorntyps. Diese Betone weisen aufgrund Ihrer hohen Mehlkorngelalte von bis zu  $600 \text{ kg/m}^3$  sehr gute Fließeigenschaften auf, da die Mehlkornsuspension ein ausgezeichnetes Transportmedium für die grobe Gesteinskörnung bildet. Mit diesen Rezepturen sind beim Einbau problemlos Fließstrecken von über 10 m zu realisieren. Mehlkorntyp-SVB haben jedoch oftmals eine deutlich höhere Festigkeit als die im Wohnungsbau üblicherweise zum Einsatz kommenden Rüttelbetone der Festigkeitsklasse C 20/25. Die Stoffkosten liegen je nach Zusammensetzung zwischen 20 und 40 % über denen von Rüttelbetonen, was für die Herstellung von Betonbauteilen im Wohnungsbau nicht unerheblich ist und zusammen mit dem erhöhten erforderlichen Überwachungsaufwand einer breiten Anwendung dort bis heute entgegengewirkt. Außerdem wurden in der praktischen Anwendung vereinzelt die erforderlichen selbstverdichtenden Eigenschaften nicht sichergestellt oder die Betone neigten zum Entmischen.

Im Rahmen eines mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung finanzierten Forschungsvorhabens wurde für Fertigteile nachgewiesen, dass bei einer ganzheitlichen Betrachtung die Herstellkosten für Bauteile aus SVB nicht höher sind als solche, die mit Rüttelbeton hergestellt wurden. Für bestimmte Bauteile sind die Herstellkosten bei der Verwendung von SVB sogar niedriger. Bei den im Wohnungsbau üblichen Bauteilen wie Platten, Wände oder Stützen mit geometrisch einfacher Formgebung und ohne Anforderungen an die Sichtbetonqualität können die Vorteile von SVB, insbesondere von Mehlkorntyp-SVB, nicht vollständig ausgenutzt werden. Durch den Einsatz von Stabilisierertyp-SVB im Wohnungsbau ist zu erwarten, dass die Baustoffqualität gesteigert und die Herstellkosten von Beton- und Stahlbetonbauteilen gesenkt werden können.

Die herausragende Eigenschaft der Mehlkorntyp-SVB, die Fließfähigkeit und das Selbstnivellierungsvermögen bei großen Fließstrecken, wird im Wohnungsbau nicht ausgenutzt, da die Fließstrecken dort selten länger als 10 m sind. Dort bietet sich der Einsatz von SVB des Stabilisierertyps an. Der Mehlkorngelalt kann bei Stabilisierertyp-SVB mit deutlich weniger als  $500 \text{ kg/m}^3$  im Bereich der Norm liegen. Bei Stabilisierertyp-SVB wird die erforderliche Fließfähigkeit - wie bei den Mehlkorntyp-SVB - über ein Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis erzielt. Der Transport der groben Gesteinskörnung beim Fließvorgang sowie die erforderliche Sedimentationsstabilität wird

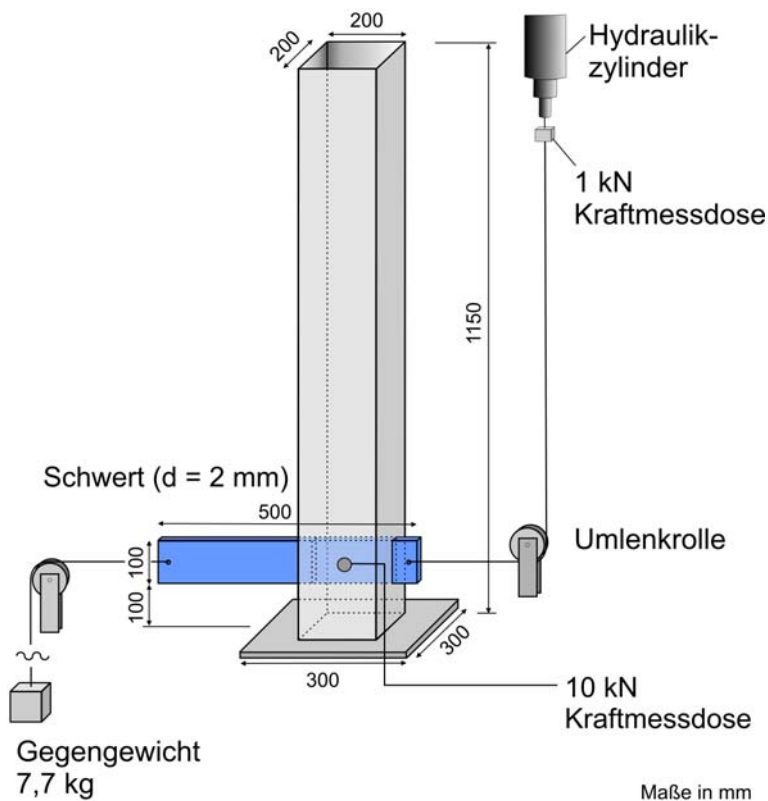
aber im Gegensatz zum Mehlkorntyp über die Modifikation der rheologischen Eigenschaften durch die Zugabe eines Betonzusatzmittels der Wirkstoffgruppe „Stabilisierer“ erreicht.

Mit Stabilisierertyp-SVB gibt es in Deutschland bislang nur sehr wenige Erfahrungen. In der Literatur wird nur vereinzelt über Baumaßnahmen in Deutschland berichtet, bei denen solche Betone eingesetzt wurden. Im Gegensatz dazu werden Stabilisierertyp-SVB in Skandinavien, insbesondere in Schweden, bislang mit großem Erfolg im Wohnungsbau eingesetzt und haben dort maßgeblich zu der Akzeptanz von SVB am Markt beigetragen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist somit, die Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit dieser Betone beim Einsatz im Wohnungsbau aufzuzeigen. Insbesondere soll anhand von Modellbetonagen überprüft werden, inwieweit Stabilisierertyp-SVB für Bauaufgaben im Bereich des Wohnungsbaues geeignet sind. Dieses erfolgt durch vergleichende Untersuchungen mit Mehlkorntyp-SVB, die vergleichbare rheologische Eigenschaften aufweisen. Die Fülleigenschaften eines SVB in einer vorgegebenen Schalung werden maßgeblich von dessen Fließeigenschaften bestimmt. Die Fließeigenschaften werden von den rheologischen Eigenschaften des SVB sowie von der Reibung zwischen SVB und Schalung, der so genannten Fluid-Struktur-Interaktion, bestimmt. Da Stabilisierertyp-SVB im Vergleich zu Mehlkorntyp-SVB aufgrund ihrer Zusammensetzung einen höheren Anteil an grober Gesteinskörnung aufweisen, die diese Reibung beeinflusst, wird ein Schwerpunkt auf die Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion gelegt.

## **2 DURCHFÜHRUNG DER FORSCHUNGSAUFGABE**

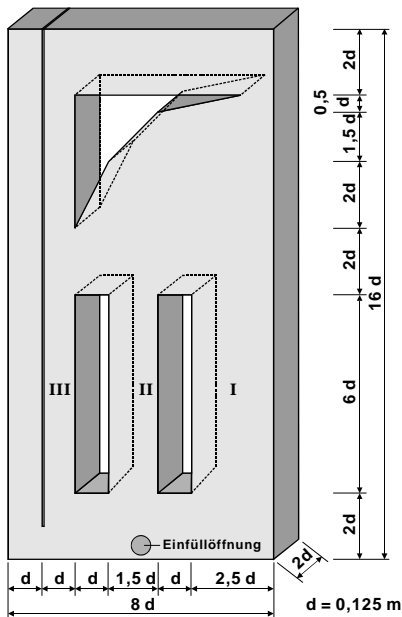
Zur Untersuchung der Fließeigenschaften von Stabilisierertyp-SVB im Vergleich zu Mehlkorntyp-SVB wurden zunächst je zwei Stabilisierertyp-SVB und zwei Mehlkorntyp-SVB mit einem Größtkorn von 16 mm entworfen und anschließend zur Charakterisierung der Mischungen ausgewählte Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Die beiden SVB-Typen wiesen jeweils eine vergleichsweise hohe und niedrige Viskosität auf. Um den Einfluss des Größtkorns zu ermitteln, wurde der Mehlkorntyp zusätzlich in einer Variante mit einem Größtkorn von 8 mm untersucht.



**Bild 1:** Prinzipskizze des Tribometers

Zur Untersuchung des Einflusses der tribologischen Eigenschaften, d. h. der Reibung zwischen SVB und Schalung, auf das Fließverhalten wurden entsprechende Tribometerversuche durchgeführt (vgl. Bild 1). Die Ergebnisse dieser Tribometerversuche wurden zur Identifikation von Einflussparametern mit rheologischen Eigenschaften der SVB und der entsprechenden selbstverdichtenden Mörtel (SVM) korreliert. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit wurde durch die Wahl einer glatt-benetzenden, einer glatt-nichtbenetzenden und einer rau-benetzenden Schalungsoberfläche untersucht.

Zur vergleichenden Untersuchung der Fließeigenschaften der untersuchten SVB wurden abschließend Modellbetonagen durchgeführt, die die Betonage eines horizontal ausgerichteten und eines vertikal ausgerichteten Bauteils praxisnah abbilden sollten. Zur Abbildung eines horizontal ausgerichteten Bauteils, wie z. B. Platten oder Balken, wurde ein modifizierter L-Kasten verwendet. Im Vergleich zu dem aus der Literatur bekannten L-Kasten wurde bei dem für die Modellbetonagen verwendeten L-Kasten der Fließkanal von 0,70 m auf 2,00 m verlängert. Bei horizontal ausgerichteten Bauteilen sollte der SVB lange Wegstrecken ohne zusätzliche Verteil- und Verdichtungsarbeit fließen können und ein schneller Einbau sollte möglich sein.



**Bild 2:** Modellbauteil Wand  
(Ansicht)

Zur Untersuchung der Strömungsvorgänge bei vertikal ausgerichteten Bauteilen wurde eine Modellwand mit den äußeren Abmessungen  $l \cdot h = 1,0 \text{ m} \cdot 2,0 \text{ m}$  verwendet (vgl. Bild 2). Ziel der Modellbetonagen ist die Feststellung des Fließ- und Füllungsverhaltens von SVB unter definierten geometrischen Randbedingungen. Eine Verengung des zu durchfließenden Querschnitts führt zu einer Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und der Fluid-Struktur-Interaktionen. Eine Umlenkung des Fließstroms führt je nach rheologischer Eigenschaft zu erheblichen Scherungen zwischen den Fließsträngen. Bei beiden Vorgängen, bei einer Verengung wie auch bei einer Umlenkung, kann es zusätzlich zu Turbulenzen kommen, die ein Entmischen des Betons bewirken können. Diese Turbulenzen sind beispielsweise für die Bewehrungsschatten verantwortlich, die teilweise bei Bauteilen, die mit SVB hergestellt wurden, auftreten.

Mit dem Wandbauteil werden die unterschiedlichen Situationen bzgl. des Geschwindigkeitseinflusses (Zone I, langsam, und Zone II, schnell) aufgezeigt. Gleichzeitig kann durch den engen Bereich (Zone III) der Einfluss der Rauigkeit von Rändern (z. B. Bewehrung) untersucht werden. Die Aussparung im oberen Bereich dient der Feststellung der Entlüftungsneigung bei unterschiedlicher Neigung der Schalung. Der linke Teil des Bauteils dient der Untersuchung des Strömungsverhaltens im schmalen, aber ungestörten Bereich, der lediglich durch eine schmale Öffnung an der Unterseite befüllt wird und somit das Füllungsverhalten bei einer indirekten Befüllung untersucht

werden kann. Die Beurteilung der Verfüllung erfolgte sowohl visuell als auch mit zerstörungsfreien Prüfverfahren.

### **3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE**

Bei der Strömung eines SVB in der Schalung handelt es sich aus strömungsmechanischer Sicht um eine inkompressible, reibungsbehaftete Strömung. Die Fließeigenschaften werden maßgeblich durch die Reibung zwischen Beton und Schalung bestimmt, der so genannten Fluid-Struktur-Interaktion. Deshalb wurde ein Schwerpunkt auf die Untersuchung der Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) zwischen Selbstverdichtendem Beton (SVB) und der Schalungsoberfläche gelegt. Insbesondere wurden die Einflussfaktoren auf die FSI anhand rheologischer und tribologischer Grundlagen ermittelt, von denen Hinweise für den praktischen Einsatz abgeleitet werden konnten.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigten, dass die Ermittlung der Reibung zwischen SVB und der Schalung maßgeblich zur Beschreibung der FSI ist. Es treten verschiedene Reibungsarten und -zustände auf. Rheologisch kann von der inneren Reibung gesprochen werden, die auftritt wenn das Fluid gesichert wird. Tribologisch sind folgende Reibungsarten und -zustände von Bedeutung. Da es sich bei SVB um ein hochgefülltes disperses Fluid handelt, tritt nach Überwindung der Haft- bzw. Ruhereibung, der Scherung des Mörtels, Mischreibung auf. Hierbei ist der Mörtel das Fluid bzw. der Schmierstoff. Die grobe Gesteinskörnung, die disperse Phase, ruft beim Kontakt mit der Schalung eine Wälzreibung hervorrufen, da sie an der Schalung vorbei gleitet, reibt, als auch abrollt.

Die bislang durchgeführten Untersuchungen zur Reibung zwischen Betonen und der Schalung zeigten, dass sowohl die Schalungsoberfläche als auch die rheologischen Eigenschaften des Betons, die Fließgeschwindigkeit und der Frischbetondruck Auswirkungen auf die Reibung haben.

Die in der Literatur beschriebenen Versuchsaufbauten wurden mit dem Ziel entwickelt, den Schalungsdruck näher beschreiben zu können. Daher werden mit ihnen höhere Drücke untersucht als bei Fließvorgängen von SVB herrschen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die systembedingte Grundreibung der Versuchsaufbauten nicht richtig erfasst werden konnte. Somit war ein eigener geeigneter Tribometer zu entwickeln mit dem die Einflussfaktoren, bei Bedingungen die beim Fließen von SVB auftreten, überprüft werden können.

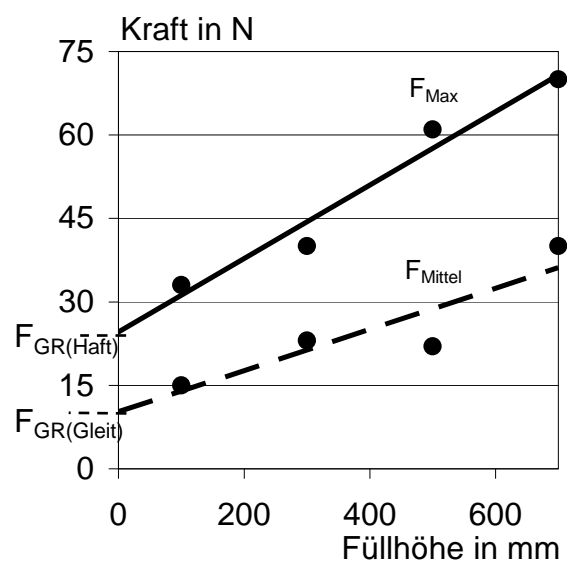
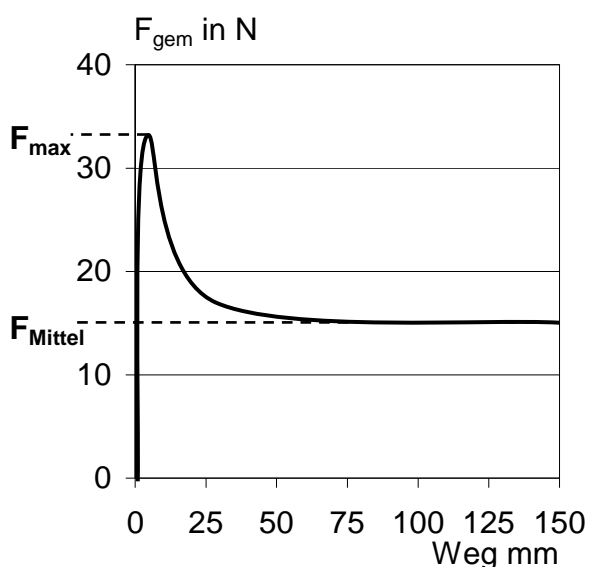
Die sechs untersuchten SVB sind mit den Frischbetonprüfungen Setzfließmaß, Trichterauslaufzeit und Fließzeiten im L-Kasten hinsichtlich ihrer Viskosität klassifiziert

worden. Diese Einordnung wurde durch Viskosimeteruntersuchungen an den jeweiligen extrahierten Mörteln überprüft und bestätigt. In den Tribometeruntersuchungen mit diesen SVB konnte festgestellt werden, dass die Viskosität der maßgebliche Einflussfaktor auf die Reibung ist, aber auch die Mischungszusammensetzung Einflüsse hat. Mit steigender Viskosität stieg auch die Scherspannung an.

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit ist durch die Wahl einer glatt-benetzenden, einer glatt-nichtbenetzenden und einer rau-benetzenden Schalungsoberfläche untersucht worden. Somit konnte der Einfluss der Benetzbarkeit und der Rauigkeit überprüft werden. Die Ergebnisse der Tribometerversuche zeigten, dass die Rauigkeit ein wichtiger Einflussfaktor ist. Dies konnte auch anhand von Fließzeitenbestimmung im L-Kasten, der mit einer glatten und rauhen Oberfläche ausgekleidet wurde, verifiziert werden. Die raue Oberfläche wies deutlich höhere Fließzeiten und größere Reibungskräfte auf.

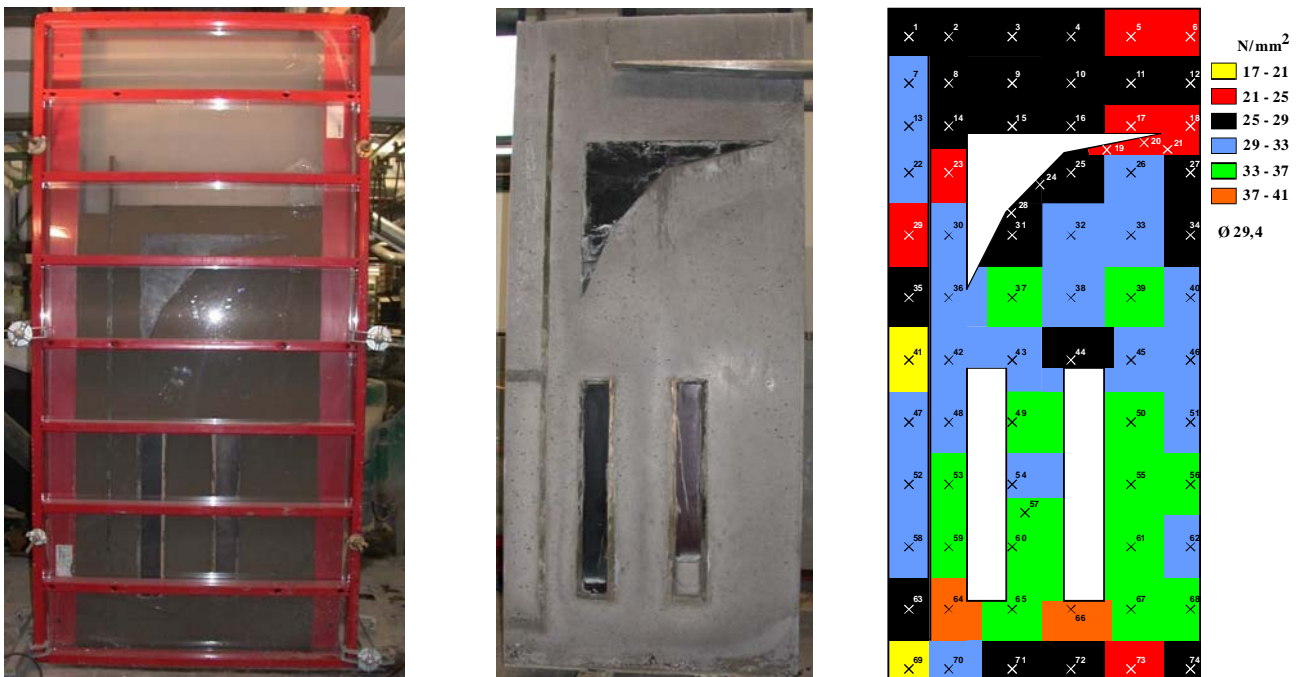
Für den Fließgeschwindigkeitseinfluss konnten in den Tribometerversuchen keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Hier waren keine klaren Tendenzen zu erkennen. Zwischen dem anstehenden Frischbetondruck und der ermittelten Scherspannung bestand hingegen ein nahezu proportionaler Zusammenhang.

Da die Grundreibung des Versuchsaufbaus, die in den gemessenen Reibungskräften enthalten ist, nicht gemessen werden kann, wurde diese durch Auftragen der Reibungskräfte über ihre zugehörigen Normalkräfte durch lineare Regression ermittelt. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Ordinate entspricht der Grundreibung des Systems, die Steigung entspricht dem Reibungskoeffizienten (vgl. Bild 3).



**Bild 3:** Darstellung der Ermittlung der Reibungskoeffizienten und der Grundreibung

Bei abschließenden Betonagen von Modellbauteilen wurde die Eignung von Stabilisierertyp-SVB für den Wohnungsbau praxisnah untersucht. Es wurden ein horizontal ausgerichtetes Modellbauteil, ein L-Kasten mit einer auf 2,0 m verlängerter Fließstrecke, und ein vertikal ausgerichtetes Modellbauteil, eine Modellwand, untersucht (vgl. Bild 4). Bei den Betonagen der beiden Modellbauteilen zeigte sich, dass bei vergleichbarem Setzfließmaß und vergleichbarer Trichterauslaufzeit der Stabilisierertyp-SVB gleiche Fülleigenschaften aufweist wie der Mehlkorntyp-SVB. Lediglich bei der Entlüftungsneigung unterhalb von Aussparungen sowie bei der Sichtbetonqualität und bei besonderen Anforderungen an die Fließeigenschaften liefert die Verwendung eines Mehlkorntyp-SVB bessere Ergebnisse.



**Bild 4:** Betonage (links), ausgeschaltete Wand (mitte) und Ergebnisse der Prüfung mit dem Rückprallhammer (rechts); niederviskoser Stabilisierertyp, Befüllen der Wand durch Einpumpen von unten

Insgesamt wurde gezeigt, dass mit Stabilisierertyp-SVB Stahlbetonbauteile für den Wohnungsbau mit hoher Qualität hergestellt werden können. Mehlkorntyp-SVB weisen zwar i. d. R. ein deutlich besseres Fließverhalten auf, jedoch kommen diese besseren Eigenschaften nur bei geometrisch komplexen Bauteilen zum Zuge. Bei erhöhten Anforderungen an die Sichtbetonqualität hat der Mehlkorntyp-SVB Vorteile. Die im



Wohnungsbau üblicherweise anzutreffenden Bauteile ohne erhöhte Anforderungen an die Sichtbetonqualität, wie z. B. Wände, Stützen, Platten und Treppen, sind gut mit einem Stabilisierertyp-SVB herstellbar. Insgesamt ist bei einem breiteren Einsatz von SVB im Wohnungsbau, sowohl von Stabilisierertyp- als auch von Mehlkorntyp-SVB, mit einer höheren Bauteilqualität zu rechnen, was insgesamt zu einer nachhaltigeren Bauweise führt.