

**Vergleichende Untersuchungen
zum Verbundverhalten von
selbstverdichtendem Beton und
Rüttelbeton anhand von Tastversuchen**

T 2953

T 2953

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5976-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR TRAGWERKSBAU
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU

Vergleichende Untersuchungen
zum Verbundverhalten
von selbstverdichtendem Beton
und Rüttelbeton
anhand von Tastversuchen

Konrad Zilch
Angelika Schießl

Forschungsbericht
November 2000

gefördert durch das
Deutsche Institut für Bautechnik

Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Institut für Tragwerksbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Zilch

Briefanschrift:
80290 München

Hausanschrift:
Gebäude N6, Theresienstraße 90, 80333 München

Tel.: 089 / 289 – 23038/39
Fax: 089 / 289 – 23046
e-mail: massivbau@massivbau.bauwesen.tu-muenchen.de

Inhalt

KURZFASSUNG, ABSTRACT, RESUME.....	2
1. EINLEITUNG.....	3
2. BETONZUSAMMENSETZUNG.....	3
3. FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN UND MATERIALKENNWERTE	4
SVB 1.....	6
SVB 3.....	6
RÜTTELBETON	6
4. VERBUNDVERSUCHE	7
4.1. TASTVERSUCHE MIT DER MISCHUNG SVB 1	7
4.2. VERGLEICHENDE VERSUCHE ZUM VERBUNDVERHALTEN VON SELBSTVERDICHTENDEN BETON UND RÜTTELBETON.....	8
4.2.1. Versuchsaufbau.....	8
4.2.2. Versuchsergebnisse	8
4.3. AUSWERTUNG DER VERBUNDVERSUCHE.....	10
4.3.1. Einfluss der Betonzusammensetzung.....	10
4.3.2. Einfluss der Betonierlage	10
4.3.3. Berechnung der Verankerungslänge	11
5. ZUSAMMENFASSUNG	14
6. LITERATUR	15
7. ANHANG	16

Vergleichende Untersuchungen zum Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton und Rüttelbeton anhand von Tastversuchen

Konrad Zilch, Angelika Schießl

Kurzfassung: In diesem Forschungsvorhaben wird zunächst die Entwicklung einer geeigneten Betonzusammensetzung für selbstverdichtenden Beton sowie die Beurteilung anhand von geeigneten Frischbetonprüfungen beschrieben. Zur Untersuchung des Verbundverhaltens wurden Pull-out-Versuche nach RILEM an Probekörpern aus selbstverdichtendem Beton und Rüttelbeton durchgeführt. Anhand der experimentell ermittelten Verbundspannungs-Verschiebungs-Beziehung wird die Verankerungslänge berechnet und mit den in den Bemessungsnormen [DIN 1045 (7/88), DIN 1045-1 (09/00)] geforderten Werten verglichen. Außerdem wird der Einfluss des Mehlkorngehaltes und der Einfluss der Betonierlage auf das Verbundverhalten untersucht.

Abstract: In this study the development of an adequate concrete composition for self compacting concrete (SCC) is described using different testing methods to assess the fresh concrete properties of SCC. For the evaluation of bond behaviour pull-out experiments according to RILEM were performed with specimens consisting of self compacting concrete and normal concrete. Basing on the experimental bond stress-slip relationship, the anchorage length was calculated and compared with the values required in the design standards DIN 1045 (7/88) and DIN 1045-1 (09/00). In addition the influence of an increased powder content and the bar position on the bond behaviour was studied.

Résumé: Tout d'abord ce rapport présente le développement d'une composition de béton auto plaçant. Des méthodes différentes sont utilisées pour juger les bétons fraîchement malaxé en fonction de leur propriétés. Pour décrire le comportement d'adhérence, des essais sont effectués selon RILEM avec des éprouvettes de béton auto plaçant et de béton normal. D'après la relation expérimentale contrainte d'adhérence – déplacement la longueur d'ancrage est calculée et comparée avec les valeurs donné dans les normes DIN 1045 (7/88) et DIN 1045-1 (09/00). Finalement ont été étudié l'influence du contenu en poudre et de la position des barres sur le comportement d'adhérence.

1. Einleitung

Selbstverdichtende Betone (SVB) wurden in Japan entwickelt. Ende der 80er Jahre war diese Entwicklung soweit, dass SVB bereits in einigen großen Bauprojekten zum Einsatz kommen konnte. In Nordamerika (besonders Kanada) und in Europa (Niederlande, Frankreich, Schweden, Österreich) werden seit Anfang der 90er Jahre Forschungsprojekte zur Untersuchung der Eigenschaften von SVB durchgeführt und auch hier werden die Erkenntnisse aus der Forschung bereits in die Praxis umgesetzt.

In Deutschland gibt es bisher nur wenige Anwendungen mit SVB, jedoch besteht von Seiten der Industrie und der Forschung wachsendes Interesse an dem neuen Baustoff. Da SVB jedoch nicht den Anforderungen der heute geltenden Normen entspricht (Konsistenz, Mehlkorngehalt), ist beim Einsatz von selbstverdichtendem Beton momentan eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Um den Einsatz von SVB zu erleichtern, wurde deshalb ein Unterausschuss des DAfStb ins Leben gerufen, der einen Sachstandbericht und eine Richtlinie ausarbeiten soll. Deshalb muss im Vorfeld überprüft werden, ob selbstverdichtende Betone alle sicherheitstechnischen Anforderungen der geltenden Bemessungsregeln erfüllen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden zunächst verschiedene Betonzusammensetzungen entwickelt und anhand von verschiedenen Frischbetonprüfungen aus der Literatur klassifiziert. Außerdem wird anhand von Tastversuchen untersucht, ob der erhöhte Mehlkorngehalt und die gleichmäßigere Kornverteilung über den Querschnitt bei selbstverdichtendem Beton zu einem veränderten Verbundverhalten gegenüber Rüttelbeton führen und ob dies zu Auswirkungen auf Bemessung und Konstruktion führt.

2. Betonzusammensetzung

Selbstverdichtender Beton ist ein Beton, der nach dem Einbringen in das Bauwerk nicht mehr verdichtet werden muss. Die Zusammensetzung des Betons wird so bestimmt, dass die Zuschlagkörner in einer Feinkornsuspension schwimmen und sich durch den Einfluss der Schwerkraft gegenseitig in Lage halten, ohne sich abzusetzen. Für den Beton ergeben sich daraus verbesserte Frischbetoneigenschaften, z.B. eine erhöhte Fließfähigkeit und eine verbesserte Verarbeitbarkeit. Der Festbeton weist eine gleichmäßigere Kornverteilung über den Querschnitt auf, da das Absetzverhalten wegen des fehlenden Vorgangs des Verdichtens wesentlich verbessert wird.

Die besonderen Frischbetoneigenschaften des selbstverdichtenden Betons können durch verschiedene Zusammensetzungstypen [1] erreicht werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde ein selbstverdichtender Beton des Kombinationstyps untersucht. Beim Kombinationstyp wird der Mehlkorngehalt (z.B. durch Flugasche, Hüttensand; Kalksteinmehl etc.) in Kombination mit einem hochwirksamen Fließmittel erhöht und ein geeignetes stabilisierendes Zusatzmittel (z.B. Welan Gum) verwendet.

Die zum Einsatz gekommenen Betonzusammensetzungen wurden entweder durch „Ausprobieren“ bestimmt (Mischung 1 und 2) oder nach dem von Walraven [2] beschriebenen Verfahren entwickelt (Mischung 3). Dieses Verfahren geht auf Prof. Okamura [3] zurück, wurde jedoch den europäischen Verhältnissen angepasst. Man bestimmt zuerst das optimale Wasser-Pulver-Verhältnis experimentell und darauf basierend wird die Betonmischung festgelegt. Über die Art des Pulvers bzw. des Mehlkorns (z.B. Flugasche, Silicastaub, fein gemahlener

Hüttensand oder Kalksteinmehl) werden bei diesem Verfahren jedoch keine genauen Angaben gemacht.

In Tabelle 1 sind die Zusammensetzungen der 3 selbstverdichtenden Betone sowie das Betonrezept für den Rüttelbeton angegeben.

	SVB 1	SVB 2	SVB 3	Rüttelbeton
Zuschläge 0/4	847 kg	818 kg	732 kg	751 kg
Zuschläge 4/8	427 kg	412 kg	442 kg	563 kg
Zuschläge 8/16	427 kg	412 kg	442 kg	563 kg
	320 kg ¹⁾	320 kg ¹⁾	262 kg ²⁾	310 kg
Wasser	171 kg	172 kg	188 kg	185 kg
Flugasche	180 kg	-	96 kg	-
Kalksteinmehl	-	275 kg	227 kg	-
Verflüssiger ³⁾	4,2 kg	3,2 kg	2,9 kg	-
Stabilisierer	0,5 kg ⁴⁾	0,8 kg ⁴⁾	0,1 kg ⁵⁾	-

1) Zement CEM I 42,5R (Schwenk)
 2) Zement CEM II/A-L 32,5R (Schwenk)
 3) FM 375 (Woermann)
 4) ST 65 (Woermann)
 5) Welan Gum

Tabelle 1: Betonzusammensetzung

3. Frischbetoneigenschaften und Materialkennwerte

Da sich der selbstverdichtende Beton insbesondere durch seine Frischbetoneigenschaften von Rüttelbeton unterscheidet, wurden in Japan neue Prüfmethode entwickelt, nach denen man einen selbstverdichtenden Beton hinsichtlich seiner Fließfähigkeit und seiner Stabilität einstufen kann [4]. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden zur Untersuchung der Frischbetoneigenschaften des selbstverdichtenden Betons der Ausbreitversuch (ohne Schlag), der V-Tunnel Test und der U-Box-Test durchgeführt (siehe Bild 1).

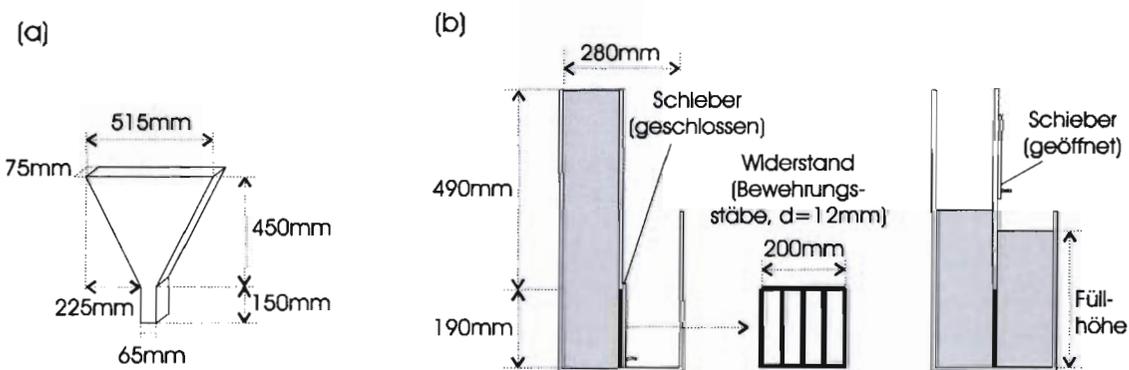


Bild 1: Frischbetonprüfungen: (a) V-Tunnel Test, (b) U-Box-Test

Das Ausbreitmaß wurde nach ASTM ermittelt (es wird ein etwas größerer Setztrichter verwendet als nach DIN 1048), um bessere Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Forschungsergebnissen zu haben. Nach [1] gilt Beton als selbstverdichtend, wenn ein Ausbreitmaß ohne Schlag von ca. 65 –75 cm erreicht wird.

Mit dem V-Tunnel Test (Bild 1(a)) wird die Fließfähigkeit des Betons untersucht. Der Trichter wird zunächst bis oben mit Beton gefüllt, dann wird die Trichteröffnung des Verschlusses geöffnet und die Zeit gemessen, die der Beton zum vollständigen Herausfließen aus dem Trichter benötigt. Nach [2] liegt die optimale Fließzeit zwischen 5 und 20 Sekunden.

Mit dem U-Box-Test lässt sich festzustellen, ob der selbstverdichtende Beton alle Anforderungen hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Selbstnivellierung erfüllt. Es handelt sich dabei um ein U-förmiges Gefäß mit jeweils zwei flächengleichen, quadratischen Rohren, die unten über eine Öffnung verbunden sind. Hinter der quadratischen Öffnung ist ein Rost aus Bewehrungsstäben als Widerstand angebracht. In das hohe Rohr (siehe Bild 1(b) – linkes Rohr) wird der Beton eingefüllt, ein Schieber verhindert das Fließen durch die Öffnung. Wenn das Rohr gefüllt ist, wird der Schieber geöffnet und der Beton fließt über die untenliegende Öffnung durch die Bewehrungsstäbe. Der Beton gilt als selbstverdichtend, wenn der Höhenunterschied zwischen den beiden Rohren anschließend nicht mehr als 8 cm beträgt.

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Frischbetonprüfungen sowie der üblichen Prüfungen nach DIN 1048 sind in Tabelle 2 angegeben.¹ An dieser Stelle ist hinzuzufügen, dass sich die Herstellung von Mischung 2 als sehr problematisch erwiesen hatte. Es wurden diverse Probenmischungen hergestellt, in denen die Kalksteinmehlmenge, der Fließmittel- und Stabilisiergehalt variiert wurden, bis man zufriedenstellende Frischbetoneigenschaften erzielt hatte. Die kleinsten Schwankungen führten bereits zum Entmischen bzw. zu einem wesentlich geringeren Ausbreitmaß. Aus diesem Grund wurde die Mischung 2 für die Verbundversuche nicht verwendet.

	SVB 1	SVB 2	SVB 3
Rohdichte (kg/m ³)	2387	2360	2366
Luftporen (%)	2,0	2,0	2,9
Ausbreitmaß a ₅ (cm)	69,0	65	66
Ausbreitmaß a ₄₅ (cm)	43,0	61	58
Höhenunterschied Box Test (mm)	55	-	45
Durchlaufzeit im V-Tunnel Test (sek)	13,5	-	6,7

Tabelle 2: Ergebnisse der Frischbetonprüfungen

Die Lagerung der Versuchskörper erfolgte nach DIN 1048 [5]. In Bild 2 ist der Erhärtungsverlauf der drei selbstverdichtenden Betone und des Normalbetons angegeben. Erwartungsgemäß ist die Festigkeit und die Nacherhärtung von der Mischung SVB 1 mit Flugasche wesentlich höher als für die anderen Mischungen ohne bzw. mit einem geringen Anteil an Flugasche.

¹ Für Mischung 2 wurden der V-Tunnel Test und der Box Test nicht durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt schon fest stand, dass man für die weiteren Versuche Mischung 1 und 3 verwenden würde.

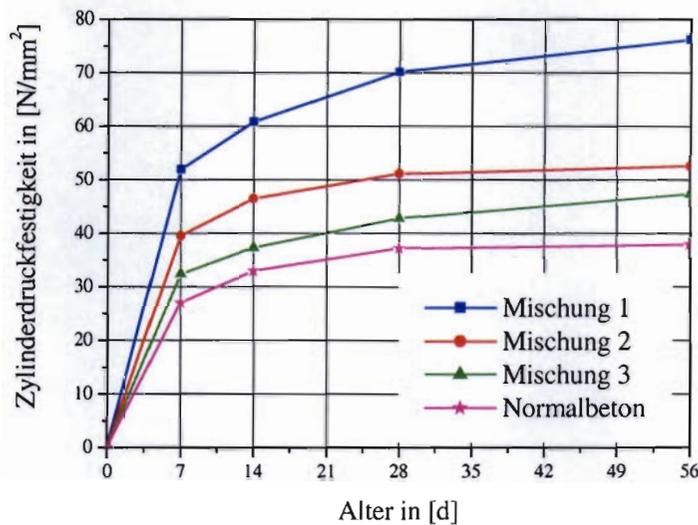


Bild 2: Erhärtungsverlauf der untersuchten Betonmischungen

Am Tag der Durchführung der Verbundversuche (28 Tage nach Herstellung der Probekörper) wurden die Druckfestigkeit und der E-Modul der Betone überprüft. Die in Tabelle 3 angegebenen Werte entsprechen dem aus 3 Einzelwerten gebildeten Mittelwert. Dabei fällt der niedrige Mittelwert des E-Moduls von selbstverdichtendem Beton auf. Verglichen mit den angegebenen Mittelwerten des E-Moduls der Tabelle 9.2 in DIN 1045-1 (siehe Tabelle 3, 3. Zeile) sind die ermittelten Werte für die selbstverdichtende Betone um fast 20 % niedriger.

	SVB 1	SVB 3	Rüttelbeton
Druckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ [N/mm ²]	70,1	40,7	29,9
E-Modul E_{cm} [N/mm ²]	34 400	26 800	27 000
E-Modul E_{cm} entsprechend f_{cm} Nach DIN 1045-1, Tabelle 10	39 200	32 700	28 700

Tabelle 3: Materialkennwerte der beiden Betonmischungen

4. Verbundversuche

4.1. Tastversuche mit der Mischung SVB 1

Die ersten Versuche wurden mit der Mischung SVB-1 gefahren. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung entsprachen den Empfehlungen von RILEM [6].

In Bild 3 ist die Verbund-Verschiebungs-Beziehung eines mittig einbetonierten Stabes dargestellt. Es zeigte sich, dass die hohe Festigkeit des Betons mit Flugasche bei hoher bezogener Verbundspannung und nur kleinen Verschiebungen (0,08-0,14 mm) zu explosionsartigem Versagen des Körpers führten.

Bei Verbundversuchen mit mittleren Betonfestigkeiten, die im üblichen Hochbau verwendet werden, ergibt sich bei Ausziehversuchen eine andere Versagensursache (Herausziehen des Bewehrungsstabes - siehe Bild 3: nb-1 - nb-3). Diesen beiden Versagensarten liegt ein unterschiedlicher Kraftmechanismus zugrunde: Das Versagen des Betons aufgrund von Ringzugkräften führt zum Sprengrissversagen und das Zermalmen des Betons vor den Stahlrippen führt zum Abscheren des Bewehrungsstabes. Da im Rahmen dieser Untersuchung angestrebt wurde, einen selbstverdichtenden Beton zu entwerfen, bei dem sich in Verbundversuchen als Versagensursache „Herausziehen des Betonstabes“ ergibt, wurden die Ergebnisse dieser Versuchsreihe nicht zu einer weiteren Bewertung herangezogen.

Jedoch sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden, ob die Bestimmungen für das Mindestmaß der Betondeckung ($c_{\min} \geq d_s$) bei der Versagensart *Sprengrissversagen* weiterhin das geforderte Sicherheitsniveau gewährleisten können oder ob es verfrüht zu einer Längsrissbildung kommt. Auch die Bestimmungen zu den Verankerungslängen sollten dahingehend überprüft werden.

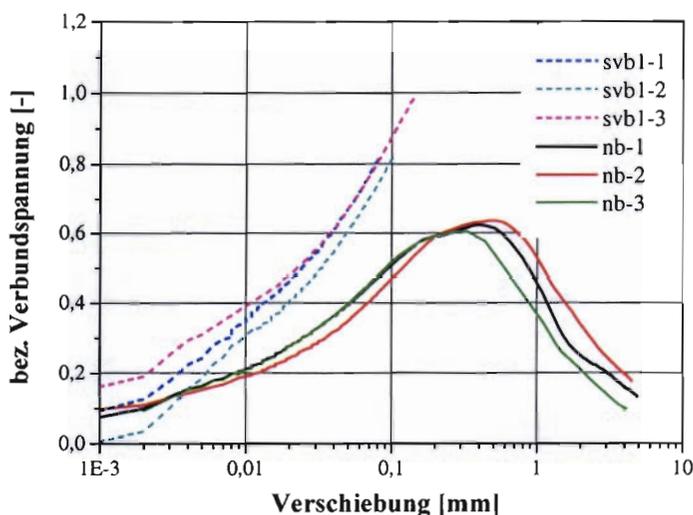


Bild 3: Tastversuche zum Verbundverhalten von Rüttelbeton ($f_{cm}=29,9 \text{ N/mm}^2$) und selbstverdichtendem Beton mit Flugasche als Mehlkorn ($f_{cm}=71,0 \text{ N/mm}^2$); Ausziehversuche nach RILEM [4], $d_s=12 \text{ mm}$, $l=60 \text{ mm}$, Kantenlänge des Würfels=20 cm

4.2. Vergleichende Versuche zum Verbundverhalten von selbstverdichtenden Beton und Rüttelbeton

4.2.1. Versuchsaufbau

Die Verbundversuche wurden an Ausziehkörpern mit den in Bild 4 angegebenen Abmessungen durchgeführt. In jeden Versuchskörper wurden 2 Stäbe mit einem Durchmesser von 12 mm einbetoniert, deren Verbundlänge 60 mm betrug. Die Betonierichtung erfolgte senkrecht zum Stab. Vor der Versuchsdurchführung wurden die Körper gespalten, so dass anhand desselben Versuchskörpers Aussagen über den Einfluss der Lage der Stäbe gemacht werden konnten. Ansonsten entsprach die Versuchsdurchführung den Empfehlungen von RILEM [6].

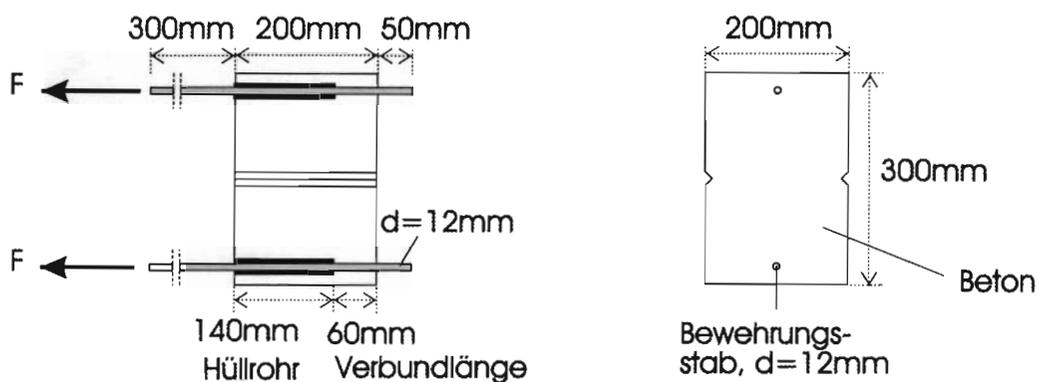


Bild 4: Versuchsaufbau

4.2.2. Versuchsergebnisse

Bei den Verbundversuchen wurden 5 Probekörper aus Rüttelbeton und 9 Probekörper aus selbstverdichtendem Beton untersucht. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde die bezogene Verbundspannung als Funktion der gemessenen Verschiebung gewählt, die sich folgendermaßen berechnen lässt:

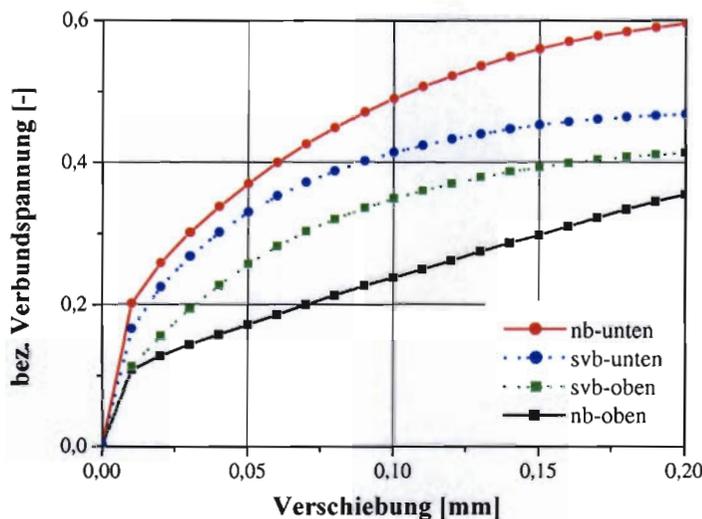
$$\frac{\tau}{f_{cm,cyl}} = \frac{F}{\pi \cdot d_s \cdot l \cdot f_{cm,cyl}} \quad (1)$$

Dabei ist F die gemessene Kraft, d_s der Stabdurchmesser, l die Verankerungslänge (entspricht 5 mal dem Stabdurchmesser) und $f_{cm,cyl}$ der Mittelwert der Druckfestigkeit der Betone (siehe Tabelle 2). Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass man die Ergebnisse beider Versuchsreihen miteinander vergleichen kann, obwohl die Betone unterschiedliche Druckfestigkeiten haben. Dies ist im Rahmen einer anfänglichen Untersuchung zulässig, da die Verbundspannung und die Betondruckfestigkeit im Verschiebungsbereich zwischen 0,1 und 0,5 mm annähernd proportional sind [7].

In Bild 5 sind die Mittelwerte der Verbund-Verschiebungs-Beziehung für unten und oben liegende Stäbe bzw. für Rüttelbeton und selbstverdichtenden Beton dargestellt. Die Einzelergebnisse sind im Anhang zu finden. In Tabelle 4 sind zusätzlich die Minimal- und Maximalwerte der einzelnen Versuchsvarianten für einige ausgewählte Verschiebungspunkte angege-

ben. Außerdem wird in Tabelle 4 die maximale Verbundspannung bei entsprechender Verschiebung angegeben. Man sieht am Unterschied zwischen Minimal- und Maximalwerten, dass die Abweichungen der einzelnen Werte vom Mittelwert durchaus im Rahmen der üblichen Streuungen von Verbundversuchen bleiben.

In der Darstellung in Bild 5 werden Verbundspannungen bis zu einer Verschiebung von 0,2 mm angegeben, da das Verbundverhalten bei großen Verschiebungen nur noch von theoretischem Interesse ist. Nach Martin und Noakowski [8] ist das Verhalten bei Verschiebungen in der Größenordnung der zulässigen Rissbreiten (0,1-0,4 mm) am belasteten Stabende maßgebend. Übertragen auf die am unbelasteten Ende gemessenen Verschiebungen beim Ausziehversuch und unter der Voraussetzung, dass die Rissbreiten etwa der doppelten Verschiebung entsprechen, erscheint daher die Angabe der Verbundspannung bei einer Verschiebung



bis 0,2 mm sinnvoll.

Bild 5: Mittelwerte der Verbund-Verschiebungs-Beziehung von unten und oben liegende Stäben für Rüttelbeton und selbstverdichtenden Beton.

	Bezogene Verbundspannung τ_{dm} [N/mm ²]														
	$\Delta = 0,01$ mm			$\Delta = 0,05$ mm			$\Delta = 0,1$ mm			$\Delta = 0,2$ mm			$\Delta (\tau_{dm, max})$		
	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	max	mittel	min	max
NB-u	0,201	0,190	0,207	0,369	0,344	0,395	0,489	0,453	0,516	0,595	0,568	0,635	0,635	0,604	0,693
													(0,38)	(0,30)	(0,38)
NB-o	0,108	0,088	0,122	0,172	0,141	0,202	0,238	0,212	0,266	0,355	0,288	0,414	0,522	0,495	0,548
													(0,69)	(0,56)	(0,59)
SVB-u	0,165	0,123	0,189	0,329	0,285	0,372	0,413	0,385	0,458	0,467	0,439	0,495	0,479	0,441	0,518
													(0,28)	(0,23)	(0,50)
SVB-o	0,112	0,095	0,144	0,256	0,228	0,315	0,348	0,317	0,388	0,413	0,382	0,437	0,427	0,409	0,445
													(0,36)	(0,33)	(0,33)

Tabelle 4: Mittelwerte, Minimal- und Maximalwerte der bezogenen Verbundspannung bei ausgewählten Verschiebungen

4.3. Auswertung der Verbundversuche

4.3.1. Einfluss der Betonzusammensetzung

Von Martin [9] wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Sieblinie und die Konsistenz einen Einfluss auf das Verbundverhalten haben. Anhand von Versuchen wurde gezeigt, dass die bezogene Verbundspannung bis zu 50% niedriger ist, je steiler die Sieblinie (entspricht einem hohen Anteil an Mehlkorn bzw. an Feinzuschlägen) bzw. je weicher die Konsistenz der entsprechenden Mischung ist. Begründet wurden diese Ergebnisse dadurch, dass im Bereich der Rippenkonsolen bei steiferer Konsistenz bzw. feinteilarmen Sieblinie örtlich ein geschlossenes Betongefüge entsteht, das geringere Absetzerscheinungen und einen höheren Betonwiderstand zur Folge hat. Bei selbstverdichtendem Beton ist der Mehlkornanteil wesentlich höher als bei den in [9] untersuchten Mischungen. Verglichen mit Rüttelbeton lässt sich also eine generelle Verschlechterung des Verbundverhaltens vermuten.

Die Versuchsergebnisse in Bild 5 bestätigen diese Vermutung (es werden nur unten liegende Stäbe betrachtet). Man sieht, dass die bezogene Verbundspannung von selbstverdichtendem Beton bis zu 25% niedriger ist als bei Rüttelbeton. Um Rückschlüsse auf die genauen Versagensursachen zu bekommen, wurden die Versuchskörper nach der Durchführung der Versuche gespalten. Bei den Versuchskörpern aus selbstverdichtendem Beton fiel auf, dass die Betonkonsolen kaum mehr erkennbar waren und dass man an den Scherflächen keine groben Zuschlagkörner sehen konnte, sondern nur Pulver. Außerdem konnte man in der Bruchfläche des Prüfkörpers aus selbstverdichtendem Beton eine größere Anzahl an Luftporen mit einem Durchmesser bis zu 2 mm erkennen als bei Rüttelbeton. Dies stimmt auch mit dem gemessenen Luftporengehalt überein (2,9% LP-Gehalt für SVB, 0,7% für NB). Wenn sich diese Luftporen an der Kontaktfläche zwischen Stahl und Beton ansammeln, könnte dies die Kraftübertragung erheblich stören. Jedoch konnte man nach der Versuchsdurchführung am aufgespaltemen Prüfkörper nur schlecht erkennen, ob sich an der Stahloberfläche tatsächlich viele Luftporen befanden.

4.3.2. Einfluss der Betonierlage

Bei Rüttelbeton kommt es durch das Verdichten zum Absetzen des Betons bzw. zu Porenbildung unter den Rippen. In [7] und [8] wird ausgeführt, dass es für oben liegende Stäbe durch den Ausfall der Rippenfläche, sowie durch den verminderten Verformungswiderstand des unmittelbar belasteten Mörtels, zu einer Abnahme der Verbundwirkung kommen kann. Dagegen ergibt sich für unten liegende Stäbe durch den Druck des darüber liegenden Frischbetons eine gleichmäßige Umlagerung der Stäbe mit Beton, was zu einem verbesserten Verbundverhalten führt.

Dieser Einfluss der Betonierlage ist auch in den Normen erfasst. Nach DIN 1045-1 (09/00) [10] gelten gute Verbundbedingungen für alle Bereiche von Bauteilen, die höchstens 300 mm über der Unterkante des Frischbetons liegen (es gibt noch andere Definitionen für gute Verbundbedingungen, diese interessieren im Rahmen dieser Forschungsarbeit aber nicht). Für alle darüber liegenden Bereiche gelten mäßige Verbundbedingungen und die zulässigen Verbundspannungen werden um 30 % abgemindert.

Diese Regelungen stellen eine Veränderung gegenüber DIN 1045 (7/88) [11] dar, nach der gute Verbundbedingungen für alle Bereiche gelten, die 250 mm über der Unterkante des Frischbetons liegen. Mäßige Verbundbedingungen sind für Bereiche anzusetzen, die oberhalb dieser Begrenzung liegen und die Abminderung beträgt hier 50%. Man sieht, dass die in DIN 1045 (7/88) geltenden Regeln konservativer als die Regeln in DIN 1045-1 (09/00) sind: Zum einen werden die zulässigen Verbundspannungen schon bei niedrigeren Bauteilhöhen abgemindert und zum anderen sind die Abminderungen im Gegensatz zum guten Verbundbereich höher.

In Bild 5 sieht man zunächst, dass bei Rüttelbeton ein großer Unterschied der bezogenen Verbundspannung zwischen unten und oben liegenden Stäben besteht (bis zu 50% niedrigere Verbundspannungen für oben liegende Stäbe). Die im Versuch oben liegenden Stäbe befinden sich nach DIN 1045 (7/88) tatsächlich im mäßigen Verbundbereich (mehr als 25 cm über der Frischbetonunterkante), die Abminderung der Verbundspannungen um 50% trifft hier also ziemlich genau die im Versuch beobachtete Abnahme der Verbundspannung von oben liegenden Stäben. Eine Abminderung von 30%, wie sie nach DIN 1045-1 (09/00) verlangt ist, spiegelt den tatsächlich vorhandenen Einfluss der Betonierlage nicht wieder. Außerdem befinden sich die oben liegenden Stäbe nach DIN 1045-1 (09/00) im guten Verbundbereich, das heißt, es ergäbe sich bei der Bestimmung der zulässigen Verbundspannungen für die oben liegenden Stäbe überhaupt keine Abminderung.

Bei selbstverdichtendem Beton halten sich die Zuschlagkörner durch innere Kräfte in Lage und der Beton muss nicht verdichtet werden. Folglich setzen sich die Zuschlagkörner in wesentlich geringerem Maße ab und sind gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. Die oben erwähnte Abnahme der Verbundwirkung für oben liegende Stäbe müsste demnach geringer ausfallen wie bei Rüttelbeton.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass für den selbstverdichtenden Beton ebenfalls eine abfallende Tendenz der Verbundwirkung für oben liegende Stäbe zu erkennen ist (siehe Bild 5). Interessant ist jedoch, dass beim Vergleich zwischen unten und oben liegenden Stäben der Unterschied zwischen den bezogenen Verbundspannungen wesentlich geringer ist (durchschnittlich 20%) wie bei Rüttelbeton. Obwohl die Verbundwirkung von selbstverdichtendem Beton generell schlechter zu sein scheint (siehe 4.3.1), führt die gleichmäßigere Struktur der Matrix dazu, dass für oben liegende Stäbe höhere Verbundspannungen zu erzielen sind wie bei Rüttelbeton.

4.3.3. Berechnung der Verankerungslänge

In [12] ist von Martin ein Verfahren angegeben (Näherungslösung durch schrittweise Integration), nach dem man die Verankerungslänge für den Bruchzustand und den Gebrauchszustand ermitteln kann. Dabei wird ein Zusammenhang zwischen der im Versuch ermittelten Verbund-Verschiebungsbeziehung und der zur Kräfteübertragung vom Beton in den Stahl benötigten Länge des Bewehrungsstahles hergestellt.

Neben der Eingabe der im Versuch ermittelten Verbund-Verschiebungsbeziehung sind vor Programmstart noch weitere Annahmen zu treffen: Der Startwert für den Schlupf am Staben-

de wird im Gebrauchszustand auf $0,001 \text{ mm}^2$ und im Bruchzustand auf $0,1 \text{ mm}$ festgelegt. Die Verbundspannung für den jeweiligen Schlupf am Stabende wird aus der im Versuch ermittelten Verbund-Verschiebungsbeziehung ermittelt. Die anfängliche Stahlspannung wird in beiden Fällen (Gebrauchs- und Bruchzustand) zu 0 gesetzt.

Für die Berechnung der Verankerungslänge wird eine Schrittweite (entsprechend einem Stababschnitt) festgelegt, für die dann jeweils die Verbundspannung, die Stahlspannung und der Schlupf ermittelt werden. Die Schrittweite mit der jeweiligen Berechnung der Spannungen wird solange erhöht, bis die vorhandene Stahlspannung die zulässige Spannung überschreitet (500 N/mm^2 im Bruchzustand und $500/1,75 = 286 \text{ N/mm}^2$ im Gebrauchszustand). Die Verankerungslänge entspricht der Aufsummierung aller betrachteten Stababschnitte.

In Bild 6 sind die Ergebnisse der Berechnung aufgetragen. Auf der linken Bildhälfte sind die Ergebnisse der schrittweisen Ermittlung der Stahlspannung im Bruchzustand (Endschlupf = $0,1 \text{ mm}$) und auf der rechten Bildhälfte im Gebrauchszustand (Endschlupf = $0,001 \text{ mm}$) dargestellt. Die erforderliche Verankerungslänge für den jeweiligen Prüfkörper kann aus dem Schnittpunkt mit der zulässigen Stahlspannung im Bruch- bzw. Gebrauchszustand abgeleitet werden. Exemplarisch ist dies im Gebrauchszustand für oben liegende Bewehrungsstäbe (Rüttelbeton) gezeigt: Für diesen Fall kann eine Verankerungslänge von 184 mm abgelesen werden. Man sieht, dass der Gebrauchszustand die Verankerungslänge von unten und oben liegenden Bewehrungsstäben bestimmt.

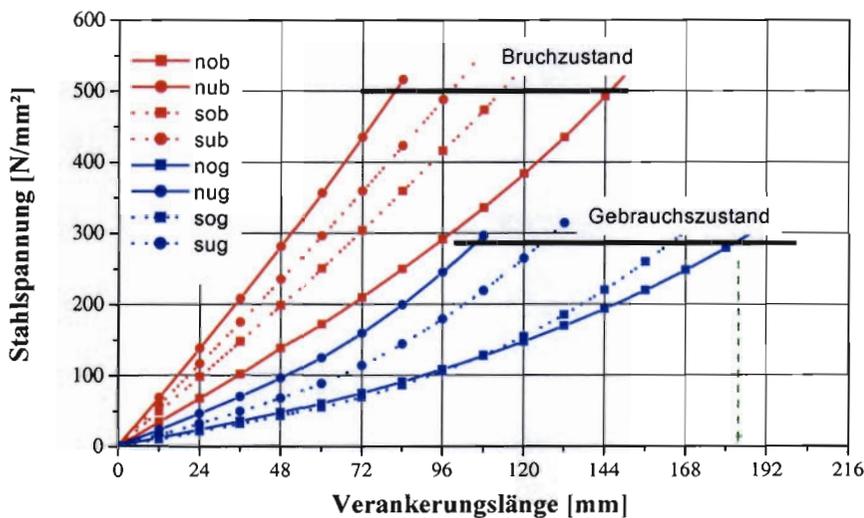


Bild 6: Mittelwerte der Verankerungslängen im Bruch- und im Gebrauchszustand für Rüttelbeton und SVB und oben und unten liegende Bewehrungsstäbe (Bezeichnungen :n(Rüttelbeton) / sVB – oben / unten – bruchzustand / gebrauchszustand)

Die genauen Maße der Verankerungslängen, die sich aus der Berechnung ergeben haben, sind in Tabelle 5 dargestellt. Weiterhin sind die berechneten Verankerungslängen den Werten aus der DIN 1045 (7/88) gegenüber gestellt. Bei der Einordnung in den Verbundbereich liegen die

² Eigentlich wäre der anfängliche Schlupf = 0 zu setzen, dies führt aber im Rahmen der gewählten Näherungslösung zu unrealistischen Ergebnissen.

oberen Stäbe gemäß DIN 1045 (7/88) im mäßigen und nach DIN 1045-1 (09/00) im guten Verbundbereich.

Man sieht, dass sich bei der Festlegung der Verbundbereiche nach DIN 1045 (7/88) relativ hohe Sicherheiten ($l_{V,DIN 1045} / l_{V,R}$) ergeben (3,4-4,6) bei der Festlegung nach DIN 1045-1 hingegen liegen die zentralen Sicherheiten für die oben liegenden Bewehrungsstäbe bei 2,3 für Rüttelbeton und 2,6 für SVB.

	$l_{V, \text{Rechnung}}$		$l_{V,DIN 1045}$	$l_{V,DIN 1045} / l_{V,R}$
	Gebrauchszustand	Bruchzustand		
NB-u	106	82	429	4,0
NB-o	184	146	847 (429)	4,6 (2,3)
SVB-u	125	99	429	3,4
SVB-o	163	113	847 (429)	5,2 (2,6)

Tabelle 5: Vergleich der rechnerischen Verankerungslängen mit den Werten aus der DIN 1045 (7/88)

Bei der Beurteilung der Sicherheit ($l_{V,DIN 1045} / l_{V,R}$) müssen noch zwei Aspekte berücksichtigt werden: Zum einen wurde die Rechnung anhand von Mittelwerten von 5 bzw. 9 Einzelproben durchgeführt. Diese Probenzahl ist zu klein, um die Ergebnisse statistisch auszuwerten, da bei der Durchführung von Verbundversuchen erfahrungsgemäß sehr große Streuungen zu erwarten sind. Der Vergleich mit den in der Norm angegebenen Verankerungslängen ist also nur bedingt aussagekräftig, da bei den Normenwerten auf der Widerstandsseite die Fraktilwerte der Baustoffeigenschaften herangezogen werden. Dazu kommt noch der Teilsicherheitsbeiwert für Beton, der bei Verbundwirkung höher als bei anderen Materialkennwerten angesetzt wird (1,5-2,1) [13].

Der zweite Aspekt betrifft die bezogene Rippenfläche des in der Untersuchung verwendeten Bewehrungsstahls. Nach DIN 488 liegt der Mindestwert für die bezogene Rippenfläche bei 0,056. Die Messung der bezogenen Rippenfläche des Stahls, der bei den Verbundversuchen verwendet worden war, lag bei 0,096 – also fast 40 % darüber. Untersuchungen von Rehm [7] und Martin [12] haben gezeigt, dass die bezogene Rippenfläche einen sehr starken Einfluss auf das Verbundverhalten von Betonstahl hat. Untersuchungen zeigen, dass die bezogenen Verbundfestigkeit ungefähr proportional zur bezogenen Rippenfläche ab- bzw. zunimmt. Das heißt, dass bei einer bezogenen Rippenfläche, die nur knapp über dem Mindestwert liegt, unter Umständen wesentlich niedrigere, bezogene Verbundfestigkeiten und somit höhere Verankerungslängen zu erwarten sind.

5. Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammen fassen:

- Selbstverdichtender Beton ist mit handelsüblichen Materialien herzustellen. Der Beton erfüllt alle Kriterien hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Verdichtungswilligkeit und Fließfähigkeit.
- Verbundversuche haben gezeigt, dass die bezogene Verbundspannung von selbstverdichtendem Beton generell unter der von Rüttelbeton liegt. Dies kann zum Beispiel an dem erhöhten Mehlkorngelalt oder an Luftporen liegen, die während der Entlüftung entstanden sind und sich an der Kontaktzone zwischen Stab und Beton angelagert haben.
- Der Unterschied zwischen unten liegenden und oben liegenden Stäben (guter und mäßiger Verbundbereich) ist bei selbstverdichtendem Beton wesentlich schwächer ausgeprägt wie bei Rüttelbeton, da durch das geringere Absetzverhalten eine gleichmäßigere Struktur der Matrix erzielt wird.
- Die Verbundversuche haben außerdem gezeigt, dass die abgeänderten Anforderungen für den mäßigen Verbundbereich in DIN 1045-1 (09/00), die im Gegensatz zu DIN 1045 (7/88) niedriger sind, noch einmal überprüft werden sollten.
- Bei einer Berechnung der Verankerungslängen haben sich zwar größtenteils ausreichende Sicherheiten ergeben, jedoch wurde diese Betrachtung unter sehr günstigen Randbedingungen durchgeführt (kleine Versuchsanzahl, Berechnung mit Mittelwerten, Verwendung eines Stahls mit sehr hoher bezogener Rippenfläche).



Konrad Zilch

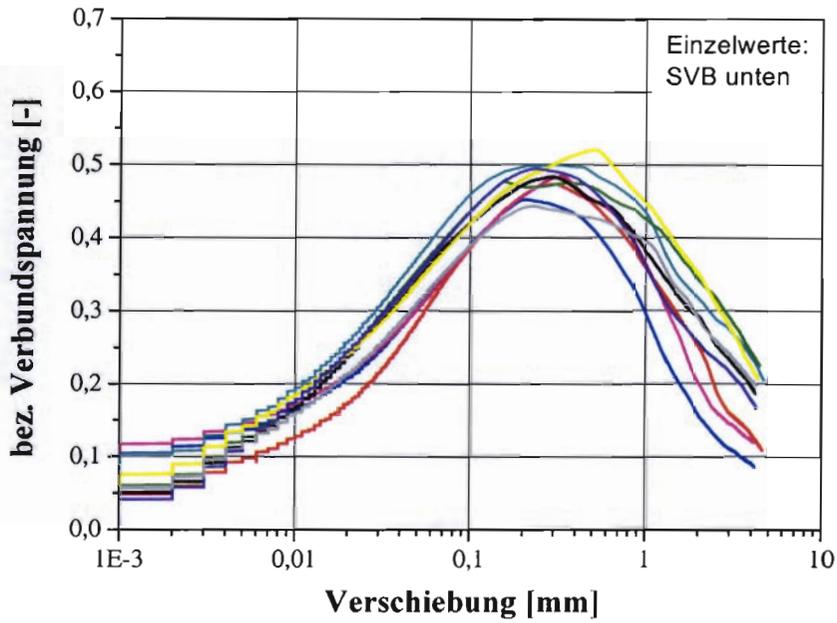


Angelika Schiebl

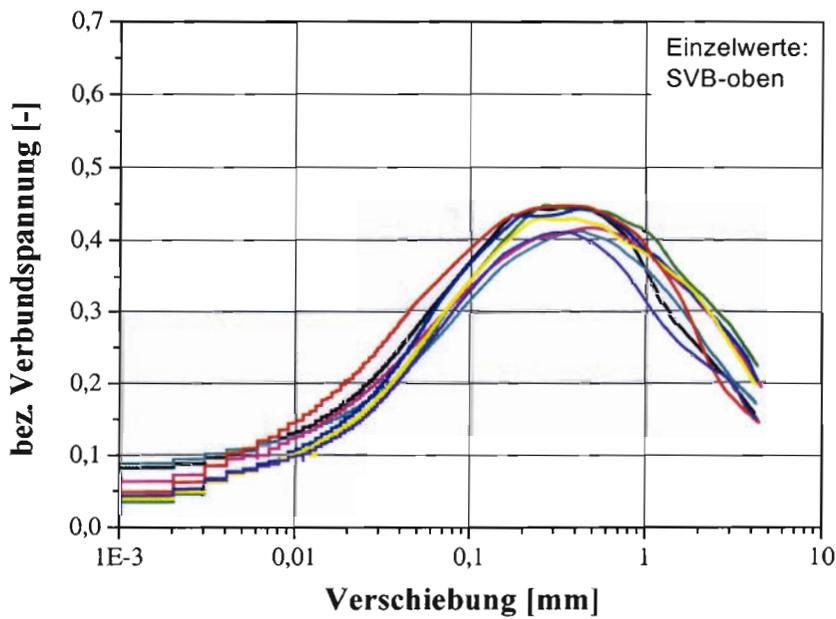
6. Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Sachstandbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Beuth Verlag. (noch nicht erschienen)
- [2] Walraven, J.C., Takada, K.: Selbstverdichtender Beton. In: Beton/Zement (1/99), S.23-27
- [3] Okamura, H.; Maekawa, K. and Ozawa, K.: Mix-Design for Self-Compacting Concrete. In: Concrete Library International of JSCE , No. 25, pp 107-120.
- [4] Ozawa, K.; Sakata, N. and Okamura, H: Evaluation of Self-Compactability of Fresh Concrete Using the Funnel Test. Concrete Library.
- [5] DIN 1048: Prüfverfahren für Beton; Ausgabe 06.91
- [6] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials: RC 6, Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out test, 1983. Published by E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, 1994
- [7] Rehm, G: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 138, Ernst & Sohn, Berlin 1961
- [8] Martin, H., Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen – Untersuchung auf der Grundlage von Ausziehversuchen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 319, Ernst & Sohn, Berlin 1981
- [9] Martin, H.: Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Verbundverhalten von Bewehrungsstählen. Gallus Rehm zum 60. Geburtstag: Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau. Herausgeber: R. Eligehausen, D. Rußwurm, Ernst & Sohn, Berlin 1984
- [10] E DIN 1045-1: 1998-11: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Entwurf November 1998
- [11] DIN 1045: Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung, Ausgabe Juli 1988
- [12] Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 228, Ernst & Sohn, Berlin 1973
- [13] Rehm, G., Eligehausen, R., Neubert, B.: Erläuterung der Bewehrungsrichtlinien. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 300, Ernst & Sohn, Berlin 1979

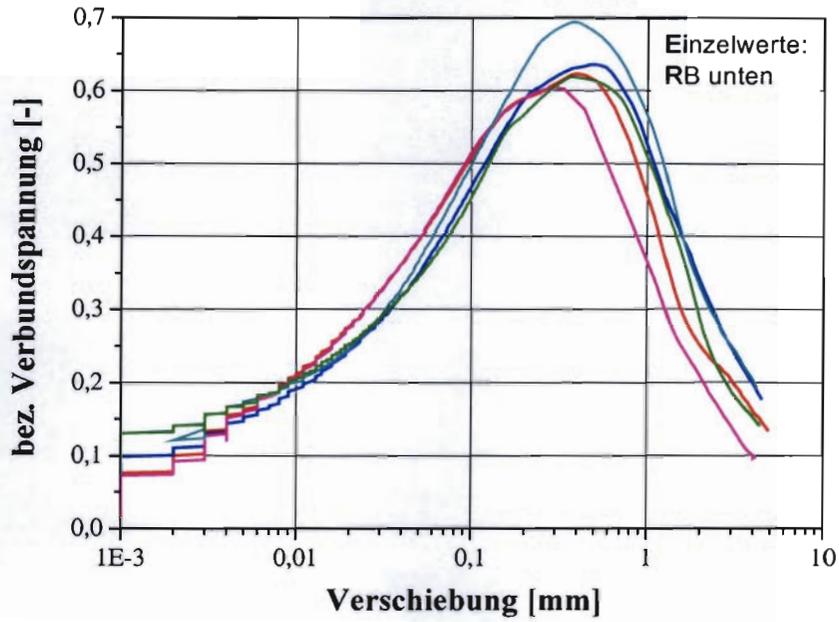
7. Anhang



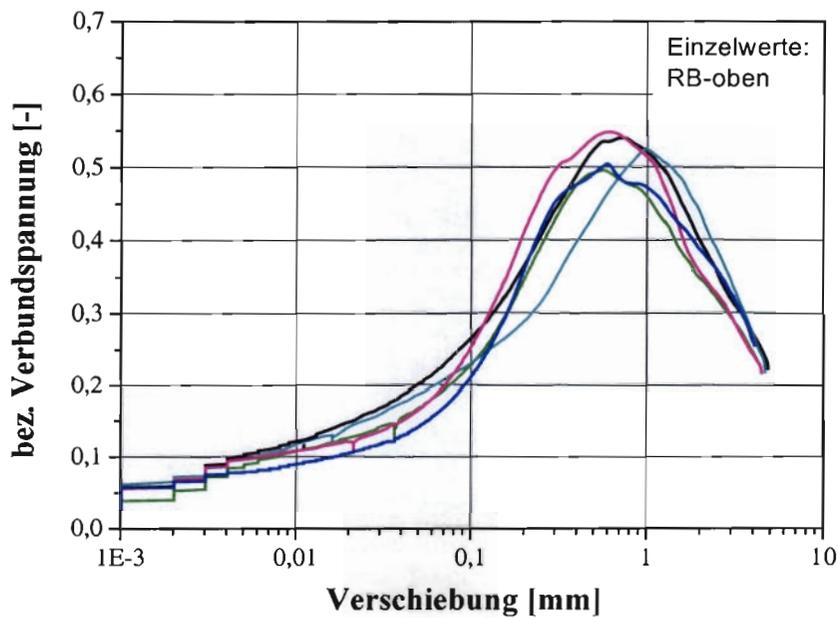
Anhang 1: Versuchsergebnisse für selbstverdichtenden Beton unten



Anhang 2: Versuchsergebnisse für selbstverdichtenden Beton oben



Anhang 3: Versuchsergebnisse für Rüttelbeton unten



Anhang 4: Versuchsergebnisse für Rüttelbeton oben