

**Verbundverhalten von  
Selbstverdichtenden  
Betonen des Kombinations-  
und Stabilisierertyps**

**T 3074**

**T 3074**

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

2005, ISBN 3-8167-6844-X

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

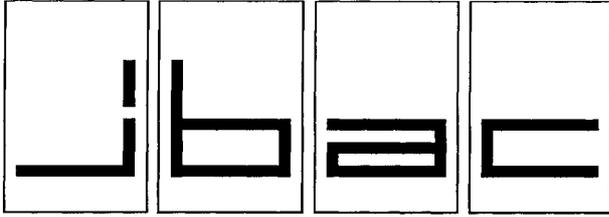
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

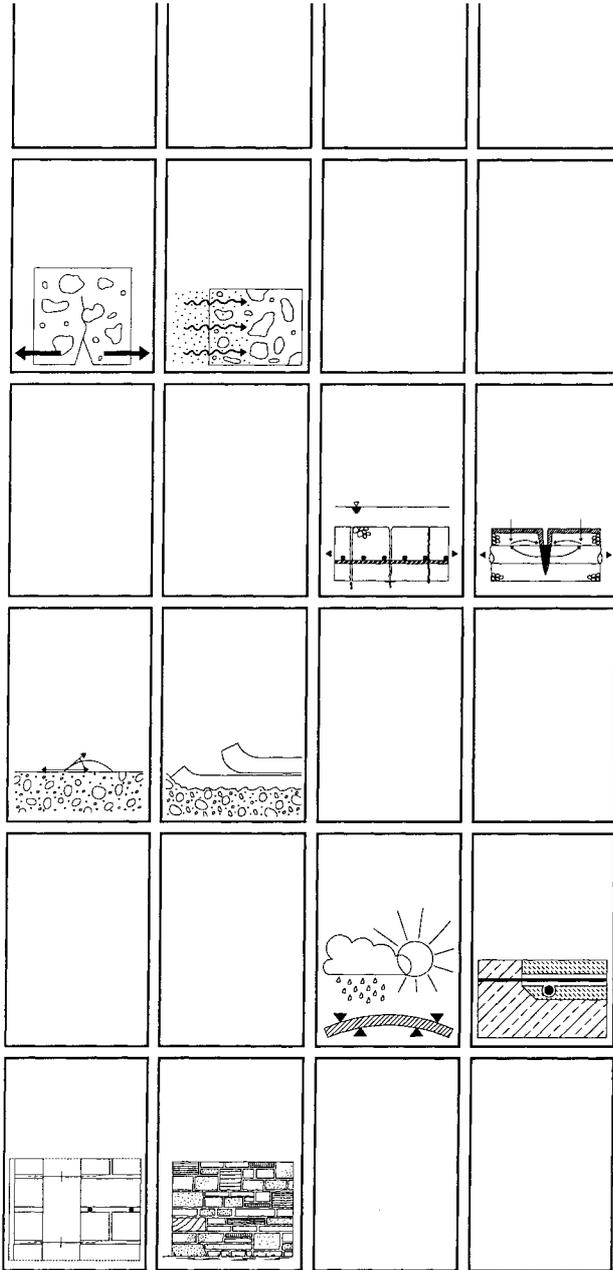
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)



**Institut für Bauforschung Aachen**  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

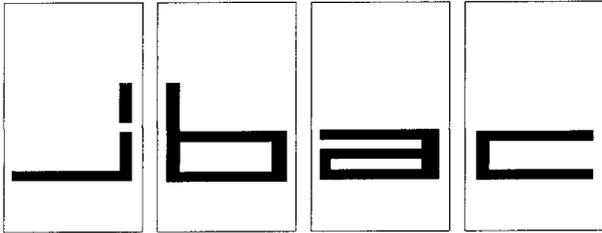


## **Forschungsbericht** **F 906**

Verbundverhalten von Selbstverdichtenden Betonen des Kombinations- und Stabilisierertyps

**Baustoff · Bauteil · Bauwerk**

**Forschung · Entwicklung**  
**Überwachung**  
**Prüfung · Beratung**



# INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen  
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-9 51 00 · Telefax (02 41) 80-9 21 39 · www.ibac.rwth-aachen.de

Sp/Fo

2. Ausfertigung

## THEMA

Verbundverhalten von Selbstverdichtenden  
Betonen des Kombinations- und Stabilisierer-  
typs

## ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 906

vom 30.11.2004

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Dipl.-Ing. F. Spörel

Auftraggeber/  
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik  
DIBt  
Kolonnenstr. 30 L

10829 Berlin

Auftragsdatum

19.04.2004

Aktenzeichen

-

Dieser Bericht umfasst 26 Seiten, davon 17 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	ALLGEMEINES .....	1
2	PRÜFPLAN.....	2
3	BETONZUSAMMENSETZUNG.....	2
4	HERSTELLUNG UND LAGERUNG.....	3
4.1	Mischen des Betons .....	3
4.2	Herstellung der Prüfkörper .....	3
4.3	Lagerung der Prüfkörper .....	4
5	FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN .....	4
5.1	Setzfließmaß mit Blockierring .....	4
5.2	Setzfließmaß .....	4
5.3	Frischbetonrohddichte und Luftgehalt .....	5
5.4	Trichterauslaufversuch .....	5
6	FESTBETONPRÜFUNGEN .....	5
6.1	Prüfung der Sedimentationsstabilität am Festbeton .....	5
6.2	Druckfestigkeit .....	7
6.3	Statischer E-Modul .....	7
6.4	Dynamischer E-Modul .....	7
6.5	Ausziehversuche .....	8
6.5.1	Prüfkörperaufbau und Verbundlagen .....	8
6.5.2	Versuchs- und Vergleichsbeton.....	9
6.5.3	Prüfung .....	10
7	DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....	11
7.1	Frischbetoneigenschaften .....	11
7.2	Druckfestigkeit .....	11

**Seite**

7.3	Statischer und dynamischer E-Modul .....	12
7.4	Ausziehversuche .....	12
8	LITERATUR .....	16
	TABELLEN .....	A1-A3
	BILDER .....	B1-B3

## 1 ALLGEMEINES

Der kraftschlüssige Verbund zwischen Beton und eingelegter Bewehrung ist wesentliche Grundlage des Verbundwerkstoffes Stahlbeton. Geprüft wird diese Eigenschaft in der Regel nach den Vorgaben der RILEM-CEB-FIB Recommendation RC 6 „Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test, 05.83“ /RIL83/. Bei Normalbeton ist dabei meist eine unterschiedliche Verbundqualität zwischen der oberen (Verbundlage II) und der unteren Verbundlage (Verbundlage I) festzustellen, wobei die obere Lage in der Regel die niedrigeren Verbundwerte aufweist (ungünstige Lage).

Während die untere (günstige) Verbundlage eher eine vergleichende Bewertung des Verbundverhaltens verschiedener Betone ermöglicht, sind die Verbundwerte der Verbundlage II in die Bemessungsansätze z. B. zur Rissbreitenbeschränkung in schlaff bewehrtem Beton anzusetzen. Bei Spannbeton mit sofortigem Verbund spielen die Verbundeigenschaften von Beton und Bewehrung in der Bemessung und Ausführung eine besonders wichtige Rolle.

Bei den in Deutschland konzipierten mehlkornreichen SVB der ersten Generation (Mehlkorngehalte zwischen 550 und 620 kg/m<sup>3</sup>) ergab sich die Erfordernis, aufgrund des von der DIN 1045-2:2001-07 /DIN01c/ abweichenden Mehlkorngehaltes die Verbundeigenschaften in die Prüfpläne für die allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen einzubinden. Es konnte beobachtet werden, dass die Qualität der beiden Verbundlagen nahezu identisch war und in etwa der günstigen Verbundlage eines Rüttelbetons etwa gleicher Festigkeitsklasse entsprach. Hieraus ergeben sich für diese SVB gegebenenfalls Reserven in der Bemessung der notwendigen Bewehrungsgehalte. In Folge der durchgängig günstigen Ergebnisse wurde bei den Zulassungsprüfungen der zwischenzeitlich beantragten SVB auf die Verbunduntersuchungen verzichtet.

Aus laufenden Verbunduntersuchungen im Rahmen anderer Forschungsvorhaben am ibac zeichnet sich nun ab, dass die an SVB des Mehlkorn types festgestellte Gleichwertigkeit der oberen und der unteren Verbundlagen nicht unbedingt auf die anderen SVB-Typen (Kombinations- und Stabilisierertyp) übertragbar ist.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens das Verbundverhalten an einem SVB des Kombinationstyp mit einem Mehlkorngehalt von etwa 520 kg/m<sup>3</sup> und einem SVB des Stabilisierertyp mit ca. 460 kg/m<sup>3</sup> Mehlkorn überprüft.

## 2 PRÜFPLAN

Aus identischen Ausgangsstoffen (Zement, Flugasche, Zuschlag und Zusatzmittel) wurden zwei Typen eines SVB mit folgenden Mehlkorngelalten hergestellt:

- Kombinationstyp mit etwa 520 – 530 kg/m<sup>3</sup> Mehlkorn,
- Stabilisierertyp mit etwa 450 – 470 kg/m<sup>3</sup> Mehlkorn.

Dabei sollte der Zementgehalt der Mischungen etwa 320 bis 360 kg/m<sup>3</sup> betragen.

An den beiden selbstverdichtenden Betonen wurden die folgenden Prüfungen durchgeführt:

- Druckfestigkeit an Würfeln im Alter von 2, 7 und 28 d,
- dynamischer und statischer Elastizitätsmodul an Zylindern im Alter von 28 d,
- Verbundversuche nach der RILEM-CEB-FIB Recommendation RC 6 „Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test, 05.83“ /RIL83/ mit oberer und unterer Bewehrungslage mit Referenzbetonen.

## 3 BETONZUSAMMENSETZUNG

Die beiden SVB wurden mit einem CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1 /DIN01a/ und einer Flugasche nach DIN EN 450:1995-01 /DIN95/ hergestellt. Es wurde Rheinsand und –kies mit einem Größtkorn von 16 mm eingesetzt. Die Sieblinie der beiden SVB ist graphisch in Bild B1, dargestellt. Die Zusammensetzung der beiden Betone kann der Tabelle 1 entnommen werden. Die Zusatzmittel wurden auf den Wassergehalt angerechnet. Beim Kombinationstyp wurde die Flugasche mit  $f_{\text{anr}} = 0,33 \cdot z = 117 \text{ kg/m}^3$  beim  $w/(z + 0,4 \cdot f)$ -Wert berücksichtigt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der SVB

Parameter	Einheit	Gehalt/Wert	
		Stabilisierertyp	Kombinationstyp
1	2	3	4
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	350	350
Flugaschegehalt		100	170
Wassergehalt		195	198
Zuschlaggehalt		1683	1615
Mehlkorngehalt		463	522
Luftgehalt	Vol.-%	1,5	1,0
w/(z+0,4f)-Wert	–	0,50	0,50
FM-Gehalt	M.-% v.Z.	0,92	1,0
ST-Gehalt		2,0	1,5

## 4 HERSTELLUNG UND LAGERUNG

### 4.1 Mischen des Betons

Die Temperatur des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraumes und der Ausgangsstoffe betrug während der Herstellung 18 bis 22 °C. Das Mischen der Ausgangsstoffe Wasser, Zement, Flugasche und Gesteinskörnung erfolgte in einem Zwangsmischer mit einem Nennvolumen von 60 l.

Beim SVB wurden zunächst Zement, Flugasche und Gesteinskörnung trocken für rd. 5 s angemischt. Dann wurden rd. 95 % des Wassers zugegeben und für 1 min gemischt. Anschließend wurde die Zusatzmittel und das restliche Wasser zugegeben und weitere 3 min gemischt.

### 4.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12390-2:2001-06 /DIN01d/. Beim Befüllen der Formen wurden die Formen beim SVB abweichend von DIN EN 12390-2 über eine rd. 0,5 m lange Rinne, die eine Neigung von rd. 20° aufwies, mit Beton gefüllt. Die Prüfkörper wurden nicht durch Rüttelenergie verdichtet.

### 4.3 Lagerung der Prüfkörper

Die Prüfkörper lagerten in folgenden Klimaten:

L2: bis zum Ausschalen im Alter von 24 h in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte  $\geq 95$  °C, dann bis zur Prüfung im Alter von 2 d unter Wasser bei 20 °C.

L7: bis zum Ausschalen im Alter von 24 h in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte  $\geq 95$  °C. Anschließend erfolgte eine Lagerung bis zum Alter von 7 d unter Wasser von 20 °C, dann an Luft bei 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte.

L<sub>RIL</sub>: gemäß /RIL83/ bis zum Ausschalen im Alter von 3 d abgedeckt mit feuchten Tüchern in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte  $\geq 95$  °C, anschließend an Luft bei 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte.

## 5 FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN

### 5.1 Setzfließmaß mit Blockierring

Der Blockierring-Versuch für den SVB wurde gemäß der SVB-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) /DAF03/ durchgeführt. Dabei wurden das sich ergebende Setzfließmaß mit Blockierring  $sm_b$  und die Setzfließzeit  $t_{b500}$  bestimmt. Der SVB des Kombinationstyps hatte ein Setzfließmaß mit Blockierring von 710 mm und eine zugehörige Setzfließzeit von 2,5 s. Der Stabilisierertyp hatte ein Setzfließmaß mit Blockierring von rd. 660 mm bei einer zugehörigen Setzfließzeit von 3 s. Die Betone zeigten keine Blockierneigung.

### 5.2 Setzfließmaß

Das Setzfließmaß  $sm$  und die Setzfließzeit  $t_{500}$  wurden mit Setztrichter gemäß DIN EN 12 350-2 /DIN00a/ entsprechend der SVB-Richtlinie /DAF03/ bestimmt. Dabei wurde der Setztrichter mit der kleineren Öffnung auf die Platte aufgesetzt. Das Setzfließmaß des Kombinationstyps betrug 730 mm bei einer Setzfließzeit von 1,5 s. Das Setzfließmaß des Stabilisierertyps betrug 700 mm bei einer Setzfließzeit von 1,5 s.

### **5.3 Frischbetonrohichte und Luftgehalt**

Die Bestimmung der Frischbetonrohichte und des Luftgehaltes erfolgte gemäß DIN EN 12 350-6 :2000-03 und DIN EN 12 350-7:2000-11 /DIN00b, DIN00c/. Das Einfüllen des SVB in den Luftporentopf erfolgte über eine 0,5 m lange Rinne, die eine Neigung von 20° aufwies. Dabei verdichtet sich der Beton ohne äußere Einwirkungen selbständig. Der Luftgehalt des Kombinationstyps betrug rd. 1,0 Vol.-% bei einer Frischbetonrohichte von 2340 kg/m<sup>3</sup> und der des Stabilisierertyps rd. 1,5 Vol.-% bei einer Frischbetonrohichte von ebenfalls 2340 kg/m<sup>3</sup>.

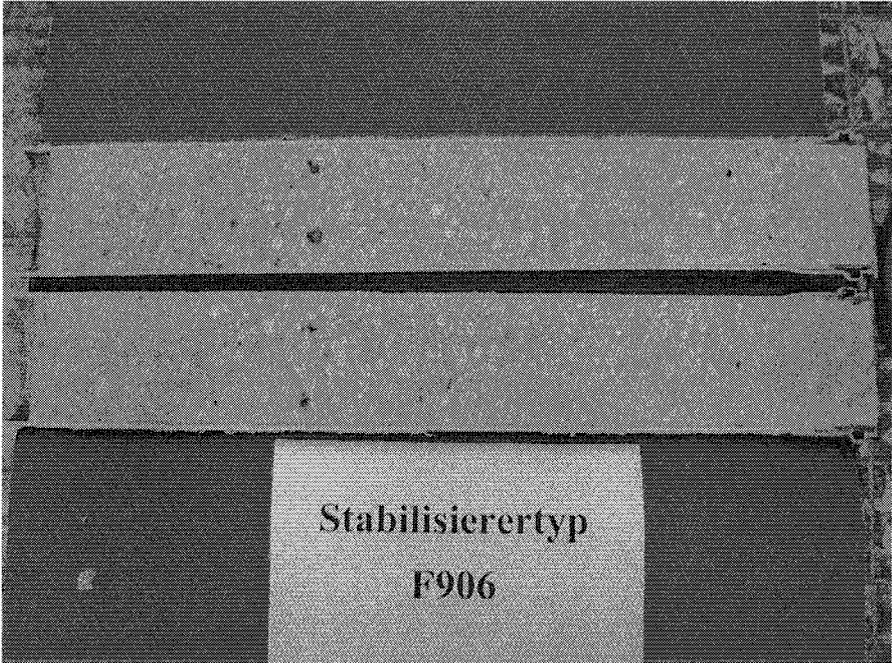
### **5.4 Trichterauslaufversuch**

Die Fließzeit durch den Beton-V-Trichter wurde gemäß SVB-Richtlinie /DAF03/ bestimmt. Die Fließzeit betrug beim Stabilisiertyp 3,0 s und beim Kombinationstyp 3,5 s.

## **6 FESTBETONPRÜFUNGEN**

### **6.1 Prüfung der Sedimentationsstabilität am Festbeton**

Am Festbeton kann die Sedimentationsstabilität an dem Schnittbild eines Betonprobekörpers beurteilt werden. Dazu wurde ein Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 500 mm mit Frischbeton gefüllt und bis zum Erhärten erschütterungsfrei gelagert. Nach dem Erhärten wurden der Zylinder mittig in Achsrichtung aufgesägt und die Schnittflächen hinsichtlich der Verteilung der groben Gesteinskörnung visuell beurteilt. Fotografien von den Sägeflächen sind in den Bildern 1 und 2 dargestellt.



**Bild 1:** Sedimentationsprüfung am Festbeton; Stabilisierertyp



**Bild 2:** Sedimentationsprüfung am Festbeton; Kombinationstyp

Beide Betone zeigen eine gleichmäßige Verteilung der groben Gesteinskörnung über den Probenquerschnitt. Eine Sedimentation der groben Gesteinskörnung ist nicht erkennbar.

## 6.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Betone wurde gemäß DIN 1048-5: 1991-06 /DIN91/ an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm sowie Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Länge von 300 mm ermittelt. Die Würfel für die Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 2 d wurden gemäß Lagerungsart L2 und die übrigen Würfel gemäß Lagerungsart L7 gelagert. Daher erfolgte die Prüfung im Alter von 2 und 7 d an feuchten, die Prüfung im Alter von 28 d an lufttrockenen Prüfkörpern. Eine Übersicht der Festbetonrohrichten der Prüfkörper befindet sich in Tabelle A1. Die Druckfestigkeit der Zylinderprüfkörper wurde im Anschluss an die E-Modulbestimmung ermittelt. Zur Anpassung an die Feuchtlagerung gemäß DIN EN 12 390-2, Abschnitt 5.5.2 /DIN01d/, wurden die ermittelten Druckfestigkeiten mit dem Umrechnungsfaktor 0,92 nach DIN 1045-2 /DIN01c/ multipliziert. Die Ergebnisse der einzelnen Betone können Tabelle A2 entnommen werden.

## 6.3 Statischer E-Modul

Der E-Modul wurde an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm ermittelt, die entsprechend DIN EN 12 390-2, Nationaler Anhang NA, gelagert wurden. Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls im Druckversuch erfolgte gemäß Belastungsdiagramm in DIN 1048-5:1991-06 /DIN91/. Die Prüfung erfolgte im Alter 28 d. Die obere Prüfspannung betrug rd. 1/3 der Druckfestigkeit. Zur Festlegung der Prüfspannung wurde die Druckfestigkeit vor Durchführung der E-Modulprüfung an einem Zylinder bestimmt. Die Dehnungen wurden mit 3 Induktivaufnehmern (Messlänge 150 mm), die im Winkelabstand von 120° angeordnet waren, erfasst. Im Anschluss an die E-Modulprüfung wurde die Druckfestigkeit an den Zylindern bestimmt.

Die Prüfspannungen sind in Tabelle A3 und der statische E-Modul in Tabelle A4 angegeben.

## 6.4 Dynamischer E-Modul

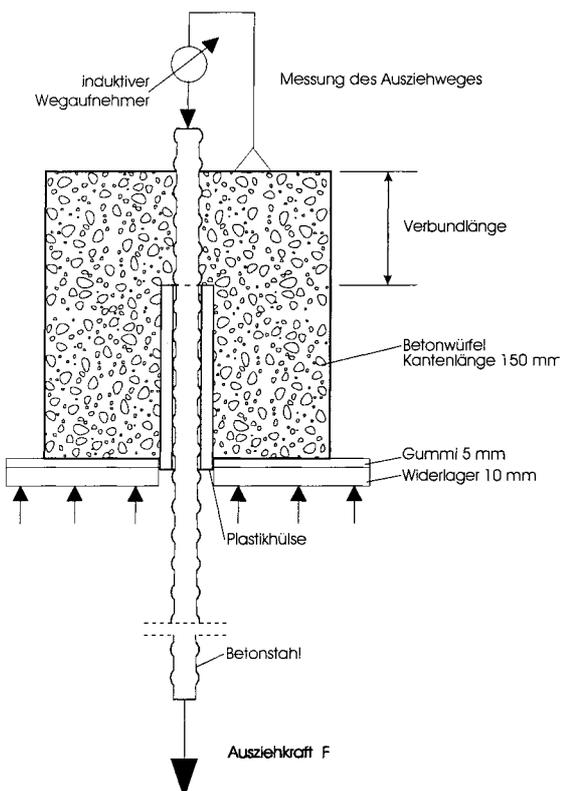
Der dynamische E-Modul wurde mit der Resonanzfrequenzmethode entsprechend Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) /DAF91/ an den Prüfkörpern, die zur Bestimmung des statischen E-Moduls vorgesehen waren, vor Bestimmung des statischen E-Moduls ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A4 enthalten.

## 6.5 Ausziehversuche

### 6.5.1 Prüfkörperaufbau und Verbundlagen

Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an RILEM-CEB-FIB Recommendation RC 6, Bond test reinforcement for steel: 2. Pull-out test /RIL83/.

Der prinzipielle Aufbau des Prüfkörpers ist Bild 3 zu entnehmen. In der Versuchsbeschreibung von RILEM RC 6 /RIL83/ sind die Stäbe mittig im Betonwürfel angeordnet. Der Nachweis des Verbundverhaltens ist jedoch für die beiden in DIN 1045-1:2001-07 /DIN01b/ Abschnitt 12.4 beschriebenen Verbundlagen zu führen. Daher wurden abweichend von RILEM RC 6 Verbundversuche mit Betonwürfeln (150 mm Kantenlänge) durchgeführt, bei denen die Stäbe aus der Betonierrichtung gesehen im unteren Würfelteil (Verbundlage I) und im oberen Würfelteil (Verbundlage II) lagegenau einbetoniert waren. Die Betondeckung der Stäbe in den Versuchskörpern geht aus Bild 4 hervor.



**Bild 3:** Prüfkörperaufbau in Anlehnung an Rilem RC 6 /RIL83/

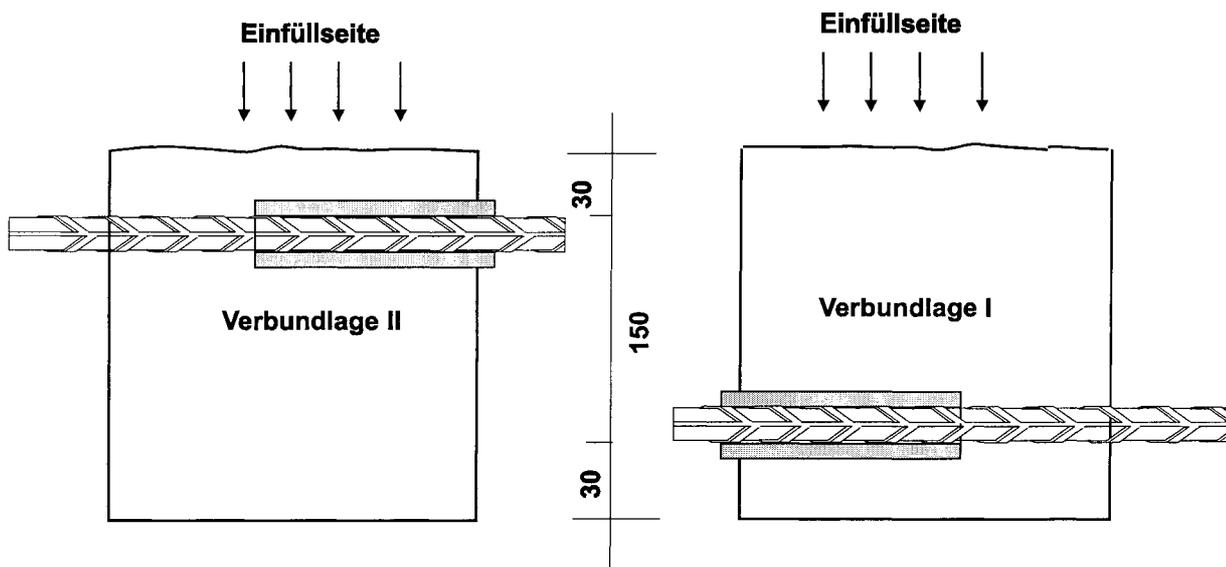


Bild 4: Betondeckung der Versuchskörper in der Verbundlage I und II (Maße in mm)

### 6.5.2 Versuchs- und Vergleichsbeton

Die Vorgaben der RILEM-Empfehlung /RIL83/ ermöglichen primär die Beurteilung von Einflüssen unterschiedlicher Rippengeometrie und Stabdurchmesser. Die in der Richtlinie genau festgelegte Zusammensetzung des Versuchsbetons beschreibt einen C 20/25 mit plastischer Konsistenz. Bei von DIN 1045 abweichenden Betonen kann der Nachweis ausreichender Verbundeigenschaften durch vergleichende Ausziehversuche mit den betreffenden Betonen und dem Beton nach RILEM RC 6 /RIL83/ erfolgen, wenn unterschiedliche Betondruckfestigkeiten als wichtigster Parameter berücksichtigt werden und Stäbe gleicher Rippengeometrie und gleichen Stabdurchmessers in die Versuchskörper eingebaut werden. Da die untersuchten SVB-Mischungen Druckfestigkeiten von  $57 \text{ N/mm}^2$  und  $58 \text{ N/mm}^2$  nach 28 d aufwiesen, wurde als Vergleichsbeton ein Rüttelbeton mit annähernd gleicher Kornzusammensetzung, gleicher Konsistenz und gleichem Zementgehalt wie der in RILEM RC 6 /RIL83/ beschriebene Beton, aber mit größerer Druckfestigkeit (C 35/45) bei der Untersuchung verwendet. Die Betonzusammensetzung der Vergleichsbetone ist in Tabelle A5 aufgeführt.

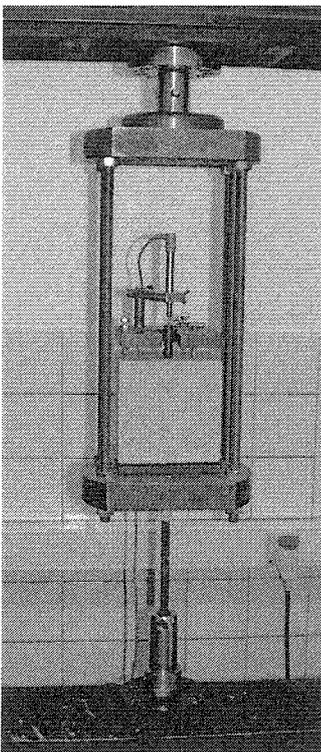
Die Herstellung und Lagerung der Versuchskörper erfolgte nach RILEM RC 6 /RIL83/. Die Verdichtung der Versuchskörper des Vergleichsbetons wurde mit einem Innenrüttler von 30 mm Durchmesser für jeweils 1 bis 2 s in jeder Würfecke vorgenommen. Zusätzliche Probewürfel wurden zur Prüfung der Würfeldruckfestigkeit auf gleiche Weise hergestellt und gelagert. Die Herstellung der Probekörper aus SVB erfolgte ohne Rütteln.

Die Prüfung der zu untersuchenden Mischungen erfolgte im Alter von 28 d. Die Druckfestigkeiten der Betone zum Zeitpunkt der Prüfung sind Tabelle A6 zu entnehmen.

In die Prüfkörper wurden Betonstähle BSt 500 S des Stabdurchmessers  $d_s = 12$  mm mit einer Verbundlänge von 60 mm eingebaut. Die bezogene Rippenfläche  $f_R$  betrug etwa 0,089 [-]. Der Sollwert für den  $f_R$ -Wert beträgt 0,056 [-].

### 6.5.3 Prüfung

Die Prüfung erfolgte auf einer elektronisch geregelten Universalprüfmaschine mit einer Laststufe von 100 kN entsprechend den Vorgaben der RILEM-Empfehlung /RIL83/. Bild 5 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau.



**Bild 5:** Prüfeinrichtung für die Ausziehversuche

Die Ausziehkraft und der Ausziehweg wurden dabei kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet.

## 7 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

### 7.1 Frischbetoneigenschaften

Die Prüfwerte bewegen sich für beide SVB in einer Größenordnung für in Deutschland eingesetzte SVB. Aufgrund der erzielten Ergebnisse der Frischbetonprüfungen kann man von ausreichenden selbstverdichtenden Eigenschaften ausgehen.

### 7.2 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung sind in Bild 6 dargestellt. Der Verlauf der Festigkeitsentwicklung zeigt keinen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden SVB. Beide SVB können der Festigkeitsklasse C35/45 nach DIN EN 206-1:2001-07 /DIN01e/ zugeordnet werden. Eine mögliche dichtere Packung, verursacht durch einen höheren Mehlkorngelalt beim Kombinationstyp, wirkt sich nicht auf die Druckfestigkeit aus. Zusätzlich sind in Bild 6 die ermittelten Druckfestigkeiten der beiden nach Lagerung  $L_{RIL}$  geprüften Betone für die Ausziehversuche dargestellt. Durch die ungünstigere Nachbehandlung ergeben sich geringfügig niedrigere Druckfestigkeiten als bei der Lagerung  $L_7$ .

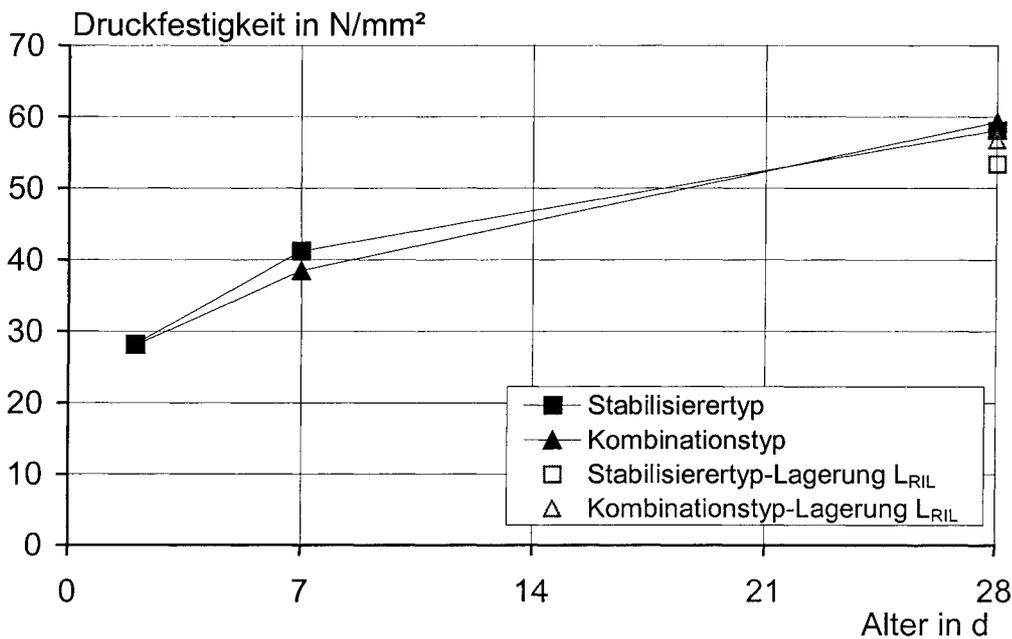


Bild 6: Entwicklung der Druckfestigkeit der beiden SVB

### 7.3 Statischer und dynamischer E-Modul

Wie bei der Druckfestigkeit ist auch beim E-Modul kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden SVB feststellbar. Der E-Modul von Beton wird maßgeblich durch die Art und den Volumenanteil der groben Gesteinskörnung und die Eigenschaften der Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung bestimmt. Durch den etwas höheren Bindemittelanteil des Kombinationstyp-SVB und einem dadurch leicht geringeren Anteil an Gesteinskörnung könnte vor diesem Hintergrund ein tendenziell niedriger E-Modul beim Kombinationstyp erwartet werden. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Volumenanteile der groben Gesteinskörnung größer als 2 mm ist bei beiden Mischung mit rd. 365 l/m<sup>3</sup> in etwa gleich. Eine möglicherweise verbesserte Kontaktzone durch den höheren Mehlkornanteil beim Kombinationstyp könnte den sogar leicht höheren E-Modul des Kombinationstyps erklären. Der E-Modul beider Betone liegt nur geringfügig unterhalb des in DIN 1045-1, Tabelle 9 /DIN01b/ angegebenen E-Moduls in der Festigkeitsklasse C35/45 von 33300 N/mm<sup>2</sup>.

Der dynamische E-Modul spiegelt die Ergebnisse des statischen E-Moduls wider. Der E-Modul des Kombinationstyps liegt leicht über dem des Stabilisierertyps.

### 7.4 Ausziehversuche

Die Ausziehkräfte wurden auf die Verbundfläche des Stabes bezogen. Die Mittelwerte der so ermittelten Verbundspannungen in Abhängigkeit vom Ausziehweg sind in Bild B2 für die Verbundlage I und in Bild B3 für die Verbundlage II dargestellt. Die ermittelten Verbundspannungen sind auszugsweise in Tabelle A7 wiedergegeben.

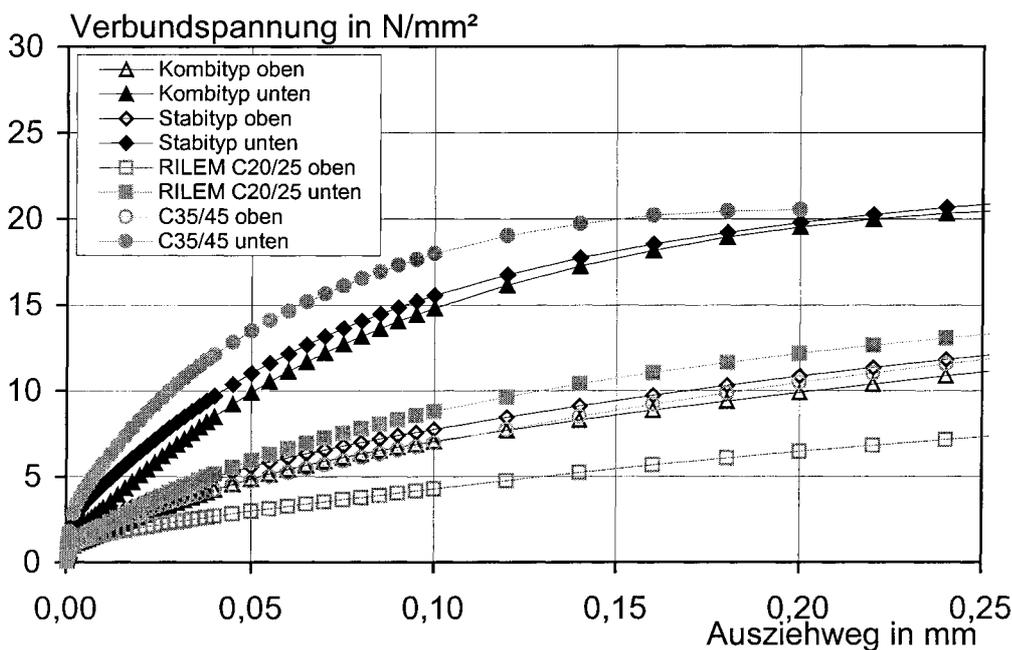
Die Verbundspannungen der SVB in beiden Lagen stimmen in etwa mit denen des Rüttelbetons mit angepasster Druckfestigkeit überein. Der Rüttelbeton C35/45 zeigt in der unteren Lage (Bild B2) geringfügig höhere Verbundspannungen als beide SVB. Der SVB des Stabilisierertyps liegt hier geringfügig über dem Kombinationstyp. Tendenziell ist hier ein Zusammenhang zum Mehlkorngehalt zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den beiden SVB sind jedoch sehr gering und liegen noch im Rahmen der Schwankungen der Einzelwerte.

In /MAR84/ wurde festgestellt, dass Betone mit feinerer Sieblinie bei Prüfung in mittiger Lage nach /RIL83/ ein schlechteres Verbundverhalten zeigen als gröber zusammengesetzte Betone. Beim SVB konnte vor diesem Hintergrund aufgrund des höheren Mehlkorngehaltes mit diesem Ergebnis gerechnet werden. Die Verbundspannungen des RILEM Vergleichs-

betons der Festigkeitsklasse C 20/25 liegen aufgrund der geringeren Druckfestigkeit erwartungsgemäß deutlich niedriger.

Bei Betrachtung der oberen Lage (Bild B3) bestehen keine Unterschiede zwischen Rüttelbeton und SVB mehr. Die in der unteren Lage geringfügig differenzierten Verbundspannungen sind hier gleichwertig. Der Unterschied zwischen oberer und unterer Lage ist somit bei den SVB etwas geringer als beim Rüttelbeton. Zwischen den beiden SVB kann kein maßgeblicher Unterschied festgestellt werden. Tendenziell erreicht der Stabilisierertyp auch hier leicht höhere Verbundspannungen als der Kombinationstyp.

Bei SVB des Mehlkorntyps sind im Vergleich zu Rüttelbeton bereits geringere Unterschiede der Verbundspannung zwischen oberer und unterer Lage bekannt. Bei den hier untersuchten mehlkornärmeren SVB ist dieser Unterschied jedoch deutlicher. Der Vergleich der Verbundspannungen beider Verbundlagen für den Kombinations- und Stabilisierertyp zeigt Differenzen, die in etwa in der Größenordnung des RILEM-Referenzbetons und bei dem an die Festigkeit der beiden SVB angepassten Rüttelbeton der Festigkeitsklasse C35/45 liegen. Bild 7 zeigt diesen Sachverhalt.



**Bild 7:** Verbundspannung in Abhängigkeit vom Ausziehweg sämtlicher Betone in beiden Verbundlagen

Ein direkter Vergleich von Betonen unterschiedlicher Druckfestigkeit ist möglich, wenn die Verbundspannung durch die jeweilige Druckfestigkeit dividiert wird. Zusätzlich wurden

Unterschiede im  $f_R$ -Wert der verschiedenen Stäbe durch eine Relation zum  $f_R$ -Sollwert von 0,056 ausgeglichen. Die in den Bildern B4 und B5 dargestellten „bezogenen Verbundspannungen“ für die untere und obere Lage ermittelten sich daher wie folgt:

$$\tau_{bez.} = \frac{\tau}{f_{cm,cube}} * \frac{f_{RSoll}}{f_{RIst}} \quad (1)$$

Darin sind:

$\tau_{bez.}$  = die bezogene Verbundspannung

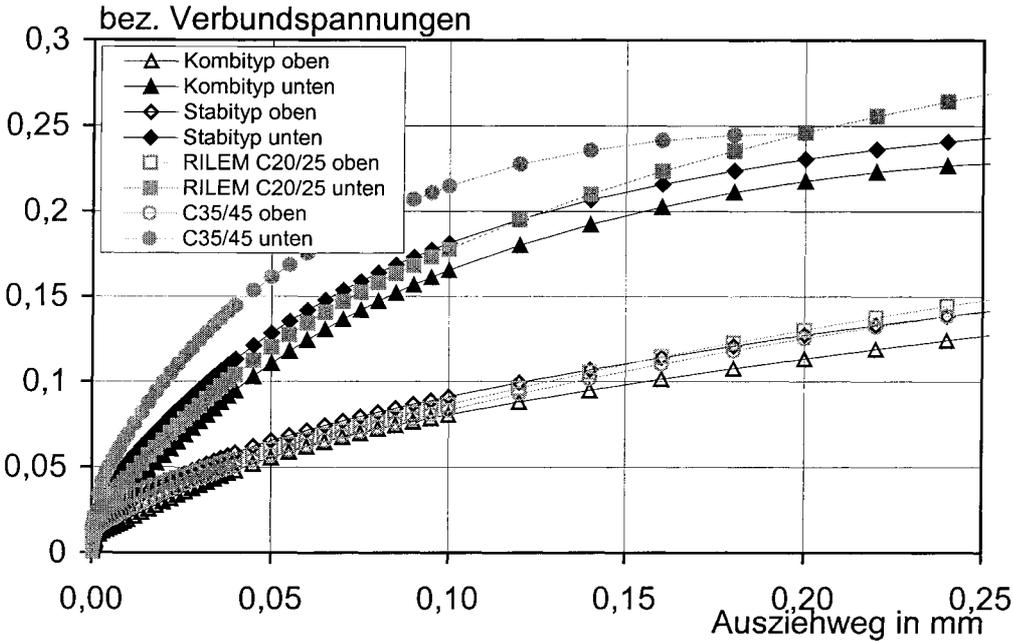
$\tau$  = die mittlere Verbundspannung aus der Ausziehkraft bezogen auf die Verbundfläche in N/mm<sup>2</sup>

$f_{cm,cube}$  = Würfeldruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> zum Zeitpunkt der Prüfung

$f_{RSoll}$  =  $f_R$ -Sollwert

$f_{RIst}$  =  $f_R$ -Istwert

Im Vergleich zeigen alle Betone ähnliches Verbundverhalten in der Verbundlage I (Bild 8). Die leicht höheren bezogenen Verbundspannungen des Rüttelbetons C 35/45 im Vergleich zu den SVB bleiben auch hier erhalten, da die Normierung aufgrund der nahezu gleichen Festigkeiten kaum ins Gewicht fällt. Es zeigt sich jedoch auch bei Betrachtung des C 20/25, dass dieser sich in gleichen Größenordnungen bewegt wie die beiden SVB. In der Verbundlage II sind ebenfalls keine maßgebenden Unterschiede zwischen den SVB und den Rüttelbetonen zu erkennen. Die Rüttelbetone und SVB zeigen also ein gleichwertiges Verbundverhalten sowohl in der oberen als auch in der unteren Verbundlage. Sowohl beim SVB als auch beim Rüttelbeton treten in der oberen Verbundlage etwa 50 % niedrigere Verbundspannungen auf als in der unteren.



**Bild 8:** Bezogene Verbundspannungen für beide Verbundlagen in Abhängigkeit vom Ausziehweg

Die bei mehlkornreichen SVB beobachteten deutlich geringeren Unterschiede zwischen der oberen und unteren Verbundlage /BRA04, SCH00/ können hier nicht festgestellt werden. Eine Abhängigkeit des Verbundfaktors zwischen unterer und oberer Lage vom Mehlkorngehalt des SVB wird bei den im Rahmen dieses Forschungsprojektes untersuchten SVB des Kombinations- und Stabilisierertyps nicht beobachtet.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die untersuchten SVB des Kombinations- und Stabilisierertyps, basierend auf gleichen Druckfestigkeiten und E-Moduln, keinen Unterschied zum bislang vom Rüttelbeton her bekannten Verhalten aufweisen.

## 8 LITERATUR

- /BRA04/ Brameshuber, W. ; Uebachs, S.: Rationalisierungspotential bei dem Einsatz eines Selbstverdichtenden Betons im Fertigteilwerk. Aachen : Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 807
- /DAF91/ Bunke, N.: Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- /DAF03/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb) Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen und Änderungen zu DIN 1045-2 2001-07 und DIN EN 206-1 2001-07 sowie DIN 1045-3 2001-07, Ausgabe 11/2003
- /DIN91/ DIN 1048-5: 1991-06. Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- /DIN95/ DIN EN 450:1995-01. Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN 450 : 1994
- /DIN00a/ DIN EN 12 350-2: 2000-03. Prüfung von Frischbeton; Teil 2: Setzmaß. Deutsche Fassung EN 12 350-2:1999
- /DIN00b/ DIN EN 12 350-6: 2000-03. Prüfung von Frischbeton ; Frischbetonrohddichte. Deutsche Fassung EN 12 350-6:1999
- /DIN00c/ DIN EN 12 350-7: 2000-11. Prüfung von Frischbeton ; Luftgehalt – Druckverfahren. Deutsche Fassung EN 12 350-7:1999
- /DIN01a/ DIN EN 197-1:2001-02. Zement ; Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1: 2000
- /DIN01b/ DIN 1045-1:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton ; Bemessung und Konstruktion
- /DIN01c/ DIN 1045-2:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton ; Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- /DIN01d/ DIN EN 12 390-2:2001-06. Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung EN 12 390-2:2000
- /DIN01e/ DIN EN 206-1:2001-07. Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000

- /MAR84/ Martin, H.: Einfluß der Betonzusammensetzung auf das Verbundverhalten von Bewehrungsstähle. Berlin : Ernst & Sohn, 1984. - In: Fortschritte im Konstruktiven Ingenieurbau, Gallus Rehm zum 60. Geburtstag, / Festschrift (Eligehausen, R. ; Russwurm, D. (Ed.)), S. 161-166
- /RIL83/ RILEM-CEB-FIB Recommendation on Reinforcement Steel for reinforced concrete; RC 6, Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test, 05.83.
- /SCH00/ Schießl, A.: Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton. Berlin : Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 2000. - In: Beiträge zum 38. Forschungskolloquium am 2. und 3. März 2000 an der Technischen Universität München, S. 177-185

Tabelle A1: Festbetonrohddichten der Probekörper

Beton	Einheit	Festbetonrohddichte							
		2 d		7 d		28d			
		Würfel				Würfel		Zylinder	
		EW	MW	EW	MW	EW	MW	EW	MW
1	2	3	4	5	6	9	10	11	12
Kombinationstyp	kg/m <sup>3</sup>	2340		2360		2320		2350	
		2330	<b>2340</b>	2340	<b>2350</b>	2310	<b>2320</b>	2320	<b>2340</b>
		2350		2360		2330		2350	
2350			2350		2340		2340		
Stabilisierertyp		2340	<b>2340</b>	2350	<b>2340</b>	2360	<b>2340</b>	2340	<b>2340</b>
		2340		2340		2340		2340	

Tabelle A2: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

Beton	Einheit	Druckfestigkeit										
		2 d		7 d		28d						
		Würfel		Würfel		Würfel			Zylinder			
		EW	MW	EW	MW	EW	MW	0,92	EW	MW	0,92	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Kombinationstyp	N/mm <sup>2</sup>	28,9		40,7		56,9				52,2		
		26,5	<b>28,1</b>	38,0	<b>38,4</b>	61,5	59,2	<b>54,5</b>	50,9	51,2	<b>47,1</b>	
		29,1		36,7		59,3			51,7			
		-		-		-			50,1			
Stabilisierertyp		29,2		42,1		58,3				50,0		
		28,5	<b>28,3</b>	41,5	<b>41,2</b>	57,9	58,1	<b>53,5</b>	48,3	48,9	<b>45,0</b>	
		27,0		40,0		58,0			48,4			
		-		-		-			49,0			

Tabelle A3: Prüfspannungen bei der Bestimmung des statischen E-Moduls im Alter von 28 d

Beton	Einheit	untere Prüfspannung	obere Prüfspannung
1	3	4	5
Kombinationstyp	N/mm <sup>2</sup>	0,5	16,8
Stabilisierertyp			16,4

**Tabelle A4:** Ergebnisse der E-Modulprüfung

Beton	Einheit	E-Modul nach 28 d			
		dynamisch		statisch	
		EW	MW	EW	MW
1	2	5	6	9	10
Kombinationstyp	N/mm <sup>2</sup>	40.800	<b>40.800</b>	32.300	<b>32.400</b>
		40.200		31.800	
		41.400		33.100	
Stabilisierertyp		39.800	<b>40.000</b>	32.700	<b>31.800</b>
		39.900		31.000	
		40.200		31.800	

**Tabelle A5:** Betonzusammensetzung des Vergleichbetons der Ausziehversuche

Bestandteil	Einheit	Vergleichsbeton C 20/25	Vergleichsbeton C 35/45
1	2	3	3
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	250	260
w/z-Wert		0,64	0,53
Zuschlag 0-2mm		639	663
Zuschlag 2-8mm		725	757
Zuschlag 8-16mm		562	583
Zusatzmittel BV		-	2,6

**Tabelle A6:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung nach Lagerung  $L_{RIL}$  zum Zeitpunkt der Ausziehversuche

Vergleichsbeton		Kombinationstyp	Stabilisierertyp
C 20/25	C 35/45		
$d_s = 12 \text{ mm}$			
N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4
31,4	52,6	56,7	53,3

Tabelle A7: Verbundspannungen für verschiedene Ausziehwege

Beton	Stab	Verbundlage	Verbundspannung bei einem Ausziehweg von		
			0,01 mm	0,05 mm	0,08 mm
-	mm	-	N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6
RILEM C 20/25	12	unten	2,12	5,93	7,81
	12	oben	1,63	2,98	3,78
Rüttelbeton C 35/45	12	unten	5,74	13,48	16,53
	12	oben	2,05	4,74	6,12
Kombinationstyp	12	unten	3,16	9,90	13,17
	12	oben	1,72	4,86	6,32
Stabilisierertyp	12	unten	4,51	11,01	14,06
	12	oben	2,44	5,57	6,98

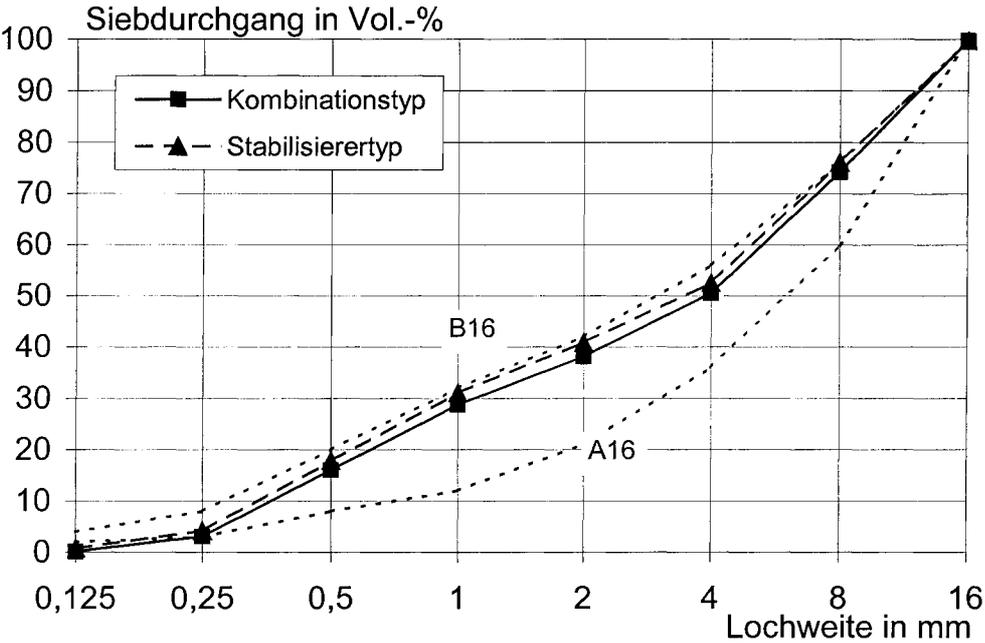


Bild B1: Sieblinie der beiden SVB

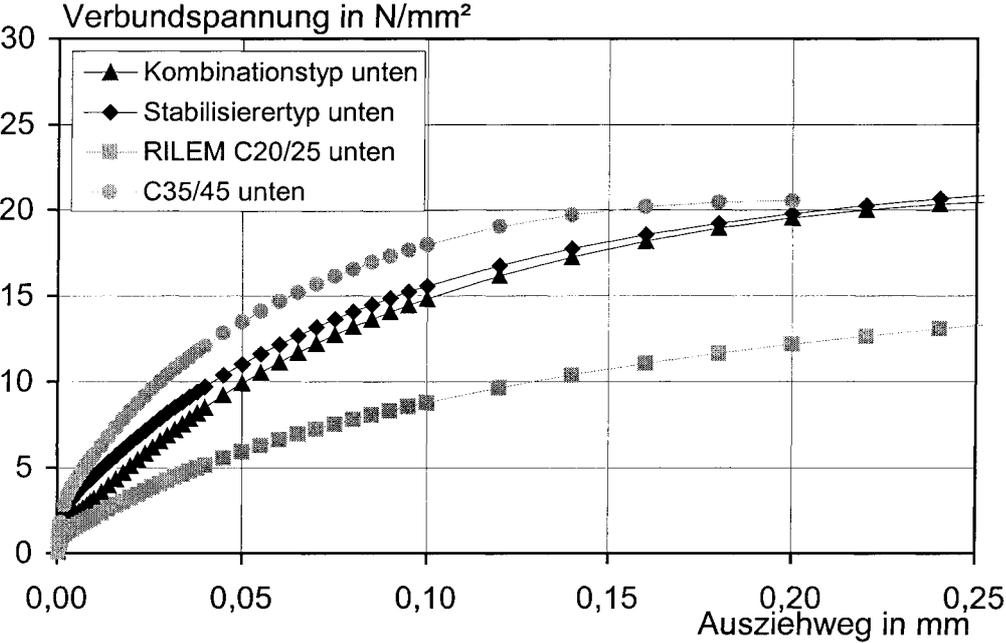


Bild B2: Verbundspannungen in Abhängigkeit vom Ausziehweg im Vergleich von SVB und Vergleichsbetonen in der Verbundlage I

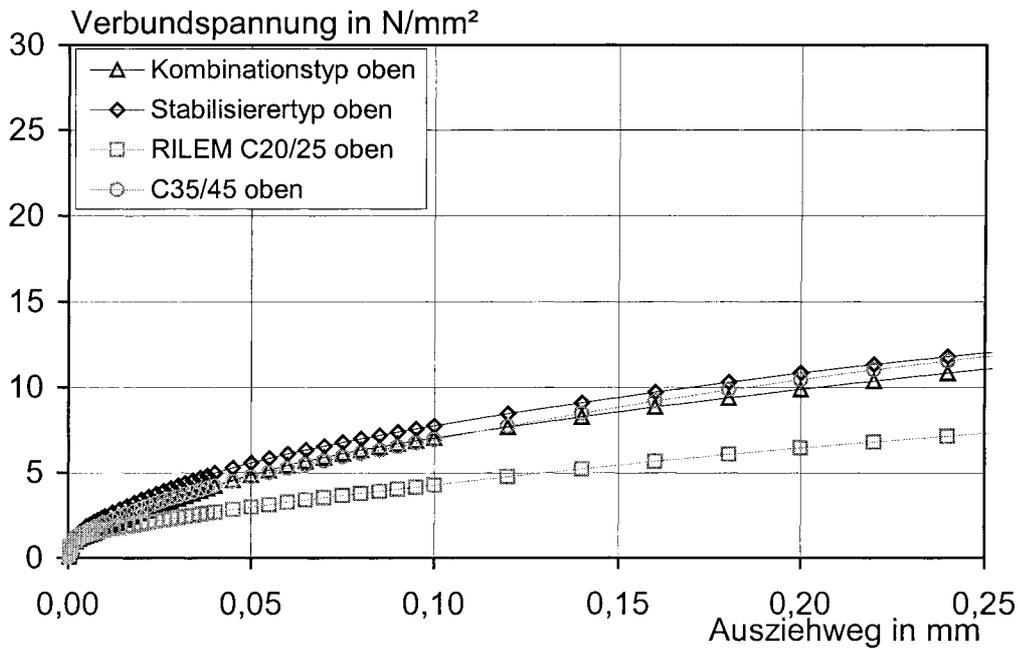


Bild B3: Verbundspannungen in Abhängigkeit vom Ausziehweg im Vergleich von SVB und Vergleichsbetonen in der Verbundlage II

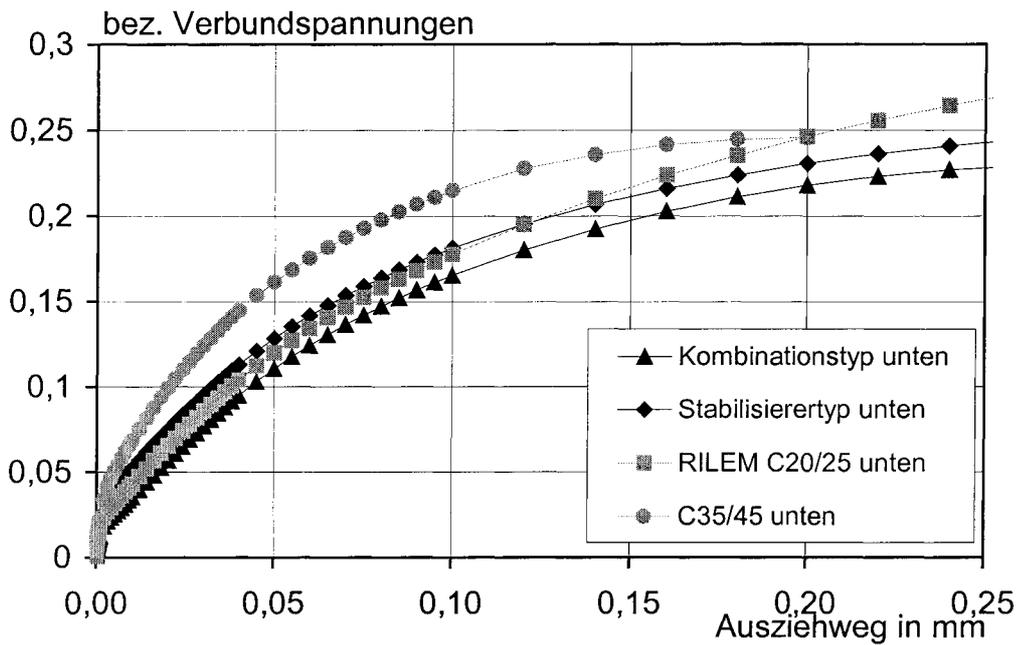
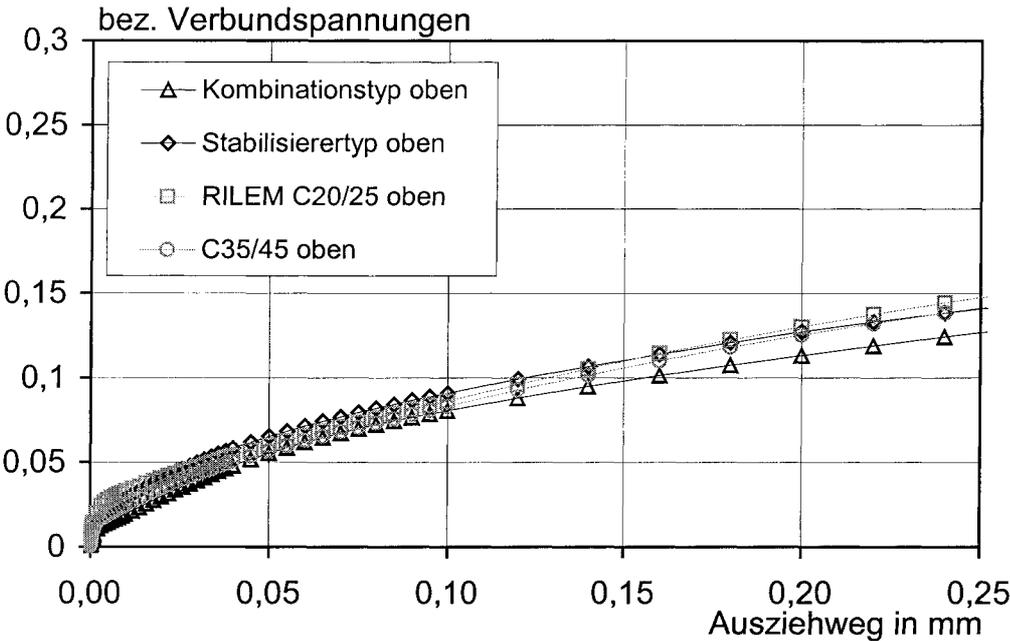


Bild B4: Bezogene Verbundspannung in Abhängigkeit vom Ausziehweg im Vergleich von SVB und Vergleichsbetonen in der Verbundlage I



**Bild B5:** Bezogene Verbundspannung in Abhängigkeit vom Ausziehweg im Vergleich von SVB und Vergleichsbetonen in der Verbundlage II