

Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton

Von Justus Bonzel und Michael Schmidt, Düsseldorf

Übersicht

Das Tragverhalten des Betons, insbesondere bei dynamischen Beanspruchungen durch wechselnde, stoßende oder sich häufig wiederholende Lasten, kann durch eine sachgerechte Zugabe von mindestens 2 Vol.-% geeigneter Stahlfasern, die im Beton gleichmäßig verteilt sind, deutlich verbessert werden.

Bisherige Untersuchungen und Erfahrungen ließen vermuten, daß Stahlfasern im Beton nicht immer gleichmäßig verteilt und auch bei gleichmäßiger Verteilung nicht in allen Richtungen orientiert sind. Um einen weiteren Aufschluß über die damit zusammenhängenden Fragen zu erhalten, wurden dazu in den Jahren 1978 bis 1981 mit finanzieller Unterstützung durch die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden an Stahlfaserbetonen unterschiedlicher Zusammensetzung die Verteilung und die Orientierung der Fasern sowie ihr Einfluß auf die Eigenschaften des Stahlfaserbetons untersucht.

Durch eine Verbesserung der Faserzugabe konnten ungleichmäßige Faserverteilung und dadurch bedingte Beeinträchtigungen der Betoneigenschaften beseitigt werden. Die Versuchsergebnisse ergaben außerdem, daß die Stahlfasern bei der Herstellung von Prüfkörpern unterschiedlicher Abmessungen, üblichen Betonierverfahren und Verdichten auf einem Rütteltisch vorwiegend in der Ebene senkrecht zur Herstell- bzw. Betonierrichtung orientiert sind und daß die Eigenschaften des erhärteten Betons im wesentlichen auch nur in dieser Ebene durch die Zugabe von Stahlfasern verbessert werden. Für eine technisch und wirtschaftlich optimale Nutzung des Stahlfaserbetons können diese Feststellungen, die allerdings noch einer Bestätigung durch Untersuchungen an Bauteilen aus Stahlfaserbeton bedürfen, von wesentlicher Bedeutung sein.

1. Allgemeines

Für bestimmte Anwendungen kann es vorteilhaft oder zweckmäßig sein, dem Beton zur Verbesserung seines Tragverhaltens, insbesondere bei dynamischen Beanspruchungen durch wechselnde, stoßende oder sich häufig wiederholende Lasten, Stahlfasern zuzu-

geben. Zu diesen Anwendungsgebieten können beispielsweise Ramppfähle, Maschinenfundamente, Schutzbauten, Bauten in Erdbebengebieten, Tunnel- und Streckenausbauten sowie Beläge für hochbeanspruchte Verkehrswege gehören. Der Stahlfaserbeton wird als üblicher Ortbeton, als Spritzbeton und auch zur Herstellung von Fertigteilen, wie z. B. teilweise für Rohre, Ramppfähle und Fassadenelemente, verwendet.

2. Stand der Erkenntnisse über Faserbeton

Seit Anfang der 60er Jahre wurden über Faserbeton eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt und zahlreiche Veröffentlichungen herausgebracht, siehe u. a. [1 bis 20]. Allein in einer Zusammenstellung der US Army Waterway Experiment Station aus dem Jahre 1976 [6] werden 660 und in einer Auswertung von Rehm [20] 790 Literaturstellen über Faserzement und -beton angeführt. Die bisherigen Arbeiten behandeln sowohl theoretische Überlegungen zur Aufgabe und Wirkungsweise der Fasern im Beton als auch Ergebnisse von Versuchen zur praktischen Herstellung von Faserbetonen im Labor und auf der Baustelle. In erster Linie gingen die Untersuchungen der Frage nach, wie sich die Zugabe von Fasern auf die Festigkeiten und die Verformungseigenschaften von Beton auswirkt und welches die wesentlichsten Einflußgrößen für die festgestellten Veränderungen der Festbetoneigenschaften sind. Aus den Ergebnissen der bisher durchgeführten Untersuchungen kann gefolgert werden, daß durch das Zumischen von Stahlfasern bei sachgerechtem Vorgehen die Betondruckfestigkeit nur geringfügig, seine Spaltzugfestigkeit und seine Biegezugfestigkeit etwa bis zum 2fachen und seine Schlagfestigkeit, sein Verformungsverhalten und sein Arbeitsvermögen wesentlich verbessert werden können. Bei den Versuchen nach [12] wies sachgerechter Stahlfaserbeton eine etwa bis zum 20fachen vergrößerte Schlagfestigkeit, einen um 10 bis 15 % kleineren Druck-Elastizitätsmodul sowie beim Druckversuch und beim Schlagversuch ein deutlich verbessertes Arbeitsvermögen auf. Die Ergebnisse dieser Versuche lassen auch erwarten, daß das Kriechen von stehend hergestellten Betonzylindern bei konstanter Druckbelastung durch einen Stahlfaserzusatz nicht wesentlich verändert wird, wenn die Fasern im Beton gleichmäßig und in Querrichtung allseitig verteilt sind und der Beton praktisch vollständig verdichtet worden ist.

Den bisher bekanntgewordenen Versuchsergebnissen können auch Feststellungen über die für Stahlfaserbeton geeignete Betonzusammensetzung und über den Einfluß von Art, Form, Abmessungen und Gehalt der Fasern auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften entnommen werden. Da Form, Abmessungen und Gehalt der Fasern teilweise die Frisch- und die Festbetoneigenschaften gegenläufig beeinflussen, ist für den Anwendungsfall eine Optimierung zwischen Faserkennwerten, Betonzusammensetzung, Frisch- und Festbetoneigenschaften erforderlich. Aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen sollte der Gehalt an üblichen Stahlfasern (glatte, gewellte und/oder abgewinkelte Einzelfasern mit Längen von 12,5 bis 30 mm) im allgemeinen 2 Vol.-% nicht unter- und 3 Vol.-% nicht überschreiten, weil ein geringerer Fasergehalt das Festbetonverhalten in der Regel nicht ausreichend verbessert

und weil bei einem größeren Fasergehalt der Frischbeton sehr schwer verarbeitbar wird und die Gefahr besteht, daß er nicht mehr praktisch vollständig verdichtet wird.

Während in den genannten Veröffentlichungen die Tendenz über die Beeinflussung der Festbetoneigenschaften durch die Stahlfasern im großen und ganzen recht einheitlich ist, streuen die Angaben über die Größenordnung der Beeinflussung teilweise erheblich. In einigen Veröffentlichungen (siehe u. a. [1, 12, 14 bis 18]) wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Fasern im Beton nach Beendigung des Mischens ungleichmäßig verteilt und an einigen Stellen konzentriert als sogenannte Igel vorhanden und nach Einbauen und Verdichten des Betons vorwiegend in einer Ebene allseits orientiert sein können. Durch die ungleichmäßige Verteilung der Fasern könnten sowohl die sachgerechte Verarbeitung des Frischbetons als auch die Festbetoneigenschaften beeinträchtigt werden; durch die Orientierung kann die wirksame Verbesserung der Festbetoneigenschaften infolge Faserzugabe auf nur zwei Beanspruchungsrichtungen begrenzt sein. Nach bisherigen Erfahrungen ist die Gefahr der Beeinträchtigung der Betoneigenschaften durch ungleichmäßige Faserverteilung bei Zugabe von Faserbündeln deutlich geringer als bei Zugabe von Einzelfasern.

Die Vermutung, daß die Fasern vorwiegend in nur einer Ebene allseits orientiert sein können, entstand bei früheren Untersuchungen (siehe u. a. [1 und 12]) dadurch, daß die Prüfkörper aus an sich gleichem Faserbeton unterschiedliche Zugfestigkeiten aufwiesen, wenn die Hauptbeanspruchungsrichtung bei der Prüfung einmal in Herstellungsrichtung und einmal senkrecht zur Herstellungsrichtung der Prüfkörper verliefen. So waren z. B. bei lediglich orientierenden Versuchen die Biegezugfestigkeit und die direkte Zugfestigkeit von stehend hergestellten Faserbetonprüfkörpern deutlich kleiner als die der entsprechend liegend hergestellten Faserbetonprüfkörper und nur etwa so groß wie die der Betonprüfkörper ohne Fasern. Orientierende Versuche an Stahlfaserspritzbeton nach [14] ergaben wegen der verfahrensbedingt sehr deutlichen Orientierung der Fasern senkrecht zur Spritzrichtung bei Beanspruchung in Spritzrichtung eine rund 3,5mal größere Energieaufnahme im Kurzzeit-Druckversuch.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Verteilung von Stahlfasern beim Einmischen in Frischbeton und ihre Orientierung im erhärteten Beton sowie die Beeinflussungsmöglichkeiten für Orientierung und Verteilung der Stahlfasern und ihr Einfluß auf die Eigenschaften des erhärteten Betons noch nicht genügend geklärt, aber für die sachgerechte Herstellung und Anwendung von Stahlfaserbeton möglicherweise von großer Bedeutung sind. Als Beitrag zur Klärung dieser Fragen wurden in den Jahren 1978 bis 1981 im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, die von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) finanziell gefördert wurden.

3. Aufgabe und Art der Untersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie sollten die Verteilung der Stahlfasern in üblichem

Stahlfaserbeton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften des Frisch- und des Festbetons untersucht sowie versucht werden, die verfahrenstechnischen Erfordernisse für eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Stahlfasern im Beton und eine Vermeidung von Faserkonzentrationen zu ermitteln. Diese Bemühungen erstreckten sich im wesentlichen auf das Verfahren der Zugabe der Stahlfasern zum Frischbeton. Im Mittelpunkt der Forschungsarbeit standen die Untersuchungen über Art und Ausmaß der Faserorientierung im erhärteten Stahlfaserbeton und ihre Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung. Dabei sollte auch der Frage nachgegangen werden, ob durch Veränderung der Betonzusammensetzung, der Frischbetonverarbeitbarkeit und/oder des Verfahrens der Prüfkörperherstellung die Orientierung der Stahlfasern im Festbeton beeinflußt werden kann. Die Faserverteilung sollte bereits am Frischbeton beurteilt werden. Darüber hinaus sollten Beobachtungen und Feststellungen über Faserverteilung und Faserorientierung an den Betonquerschnittsflächen der Festbeton-Prüfkörper und an gesondert vorbereiteten Prüfkörpern z. B. durch augenscheinliche Beurteilung, durch Beurteilung von Röntgenaufnahmen oder durch mikroskopische Auszählung nach dem Meßlinienverfahren durchgeführt werden. Dem Einfluß auf die Festbetoneigenschaften wurde durch die Prüfung der Festigkeiten und der Verformungseigenschaften und durch Ermittlung der Energieaufnahme in unterschiedlichen Beanspruchungsrichtungen nachgegangen. *)

In Vorversuchen wurden zunächst die für den Untersuchungszweck geeigneten Betonzusammensetzungen ermittelt. Die Hauptversuche gliederten sich in die beiden folgenden Versuchsserien:

- In Serie 1 wurden an Betonen verschiedener Zusammensetzung die Auswirkungen verschiedener Faserbetonherstellverfahren auf die Faserverteilung und orientierend auf die Frisch- und die Festbetoneigenschaften untersucht.
- In Serie 2 wurden die Frischbeton- und die Festbetoneigenschaften von Stahlfaserbetonen mit gleichmäßiger Faserverteilung sowie Art und Ausmaß der Faserorientierung in Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung und ihre Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften untersucht.

4. Umfang und Durchführung der Untersuchungen

4.1 Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung

Für alle Versuche wurde ein Portlandzement Z 35 F des Werkes A verwendet, der DIN 1164 entsprach. Bei Prüfungen nach DIN 1164 betrug seine spezifische Oberfläche 3020 cm²/g, der Wasseranspruch 25,5 Gew.-%, der Erstarrungsbeginn 2 h 20 min, das Erstarrungsende 3 h 30 min, die Druckfestigkeit nach 2 Tagen 24 N/mm² und nach 28 Tagen 51 N/mm².

*) An der Betreuung der Versuche und an der Beurteilung der Faserorientierung mit Hilfe von Röntgenaufnahmen war Herr Prof. Dr.-Ing. Dahms wesentlich beteiligt.

Als Betonzuschlag kamen Rheinkiessand der Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm aus dem Raum Düsseldorf sowie Quarzsand 1/2 mm und Quarzmehl 0/0,25 mm aus dem Raum Köln zur Anwendung. Der Betonzuschlag entsprach nach Angaben der Lieferwerke und aufgrund augenscheinlicher Beurteilung den Anforderungen von DIN 4226 Teil 1. Die Kornzusammensetzung der Zuschlaggemische entsprach sowohl bei den Vorversuchen als auch bei den Hauptversuchen den Sieblinien B 8, B 16 und B 32 der DIN 1045. Als Zugabewasser wurde Düsseldorfer Leitungswasser verwendet. Die Stahlfasern waren gerade, glatte Einzelfasern mit einer Länge von 25 mm und einem Durchmesser von 0,4 mm des Werkes B.

Aufgrund der Vorversuche, deren Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften Tafel 1 enthält, wurden die Hauptversuche, deren Faserbetone mit 2 Vol.-% gleichmäßig verteilten Stahlfasern ausreichend verarbeitbar sein und einen nicht zu großen Verdichtungsaufwand erfordern sollten, an Beton mit einem w/z-Wert von 0,50, mit Fasergehalten zwischen 0 und 3 Vol.-% und mit Zementgehalten durchgeführt, die beim Zuschlaggemisch B 8 360 und 400 kg/m³ und bei den Zuschlaggemischen B 16 und B 32 330 und 360 kg/m³ betragen. Die Betonzusammensetzung der Hauptversuche geht für die Serie 1 aus Tafel 2 und für die Serie 2 aus Tafel 3 hervor.

4.2 Herstellung und Lagerung

4.2.1 Frischbeton

Die Betonausgangsstoffe (Zement, Zuschlag, Zugabewasser und ggf. Stahlfasern) wurden nach Gewicht abgemessen. Alle Frischbetone wurden in Chargen von 80 bis 100 l in einem 250-l-Tellermischer gemischt. Die Mischzeit betrug bei den Betonen ohne Faserzusatz stets 90 Sekunden nach Zugabe aller Ausgangsstoffe. Die Frischbetontemperatur der Betone lag bei etwa 20° C.

Für die Zugabe der Fasern und für den Mischvorgang wurden bei den Faserbetonen der Serie 1 (Tafel 2) fünf verschiedene und für gleichmäßige Faserverteilung unterschiedlich wirksame Verfahren (Verfahren 1, 2, 3 a, 3 b und 4 der Tafel 4) und bei den Faserbetonen der Serie 2 (Tafel 3) nur die beiden Verfahren mit gleichmäßiger Faserverteilung (Verfahren 3 b und 4 der Tafel 4) angewendet, und zwar bei den Faserbetonen für die 20-cm-Würfel, die Zylinder 15/30 cm und die liegend und stehend hergestellten Balken 15/15/70 bzw. 75 cm das Verfahren 3 b und für die Balken 20/20/90 cm (siehe Tafel 5) das Verfahren 4. Die fünf Verfahren, deren Einzelheiten aus Tafel 4 hervorgehen, unterscheiden sich im wesentlichen durch die Beschaffenheit zu Beginn der Faserzugabe, durch Art und Dauer der Faserzugabe, durch die Verteilung des Betons im Mischer während der Faserzugabe sowie durch Zwischenmischen und Dauer des Nachmischens und die Gesamtmischzeit. Die bei den Betonen der Serie 2 nach dem Mischen noch vereinzelt festgestellten Faserkonzentrationen (sogenannte Igel) wurden durch Stochern und Schlagen mit einem Spaten zerkleinert, danach wurde der Beton durch Umschaukeln nochmals durchgemischt. Die Frischbetoneigenschaften und das jeweils angewendete Herstellverfahren nach Tafel

Tafel 1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der Vorversuche zur Ermittlung der geeigneten Betonzusammensetzung

Beton-Nr.	Zuschlag-gemisch	Zement-gehalt kg/m ³	w/z	Faser-gehalt Vol.-%	Frisch-beton-rohdichte kg/dm ³	Luft-gehalt Vol.-%	Verdichtungsmaß		Verdichtungsaufwand 20-cm-Würfel					
							Auflast kg	v	Auflast kg	Rüttelzeit s	erforderlich			
V.1	B 8	300	0,50	2	2,40	4,2	10,2	1,65	10,2	45	sehr groß			
V.2		330			2,40	3,7	5,7	1,63				5,7	45	sehr groß
V.3		360			2,43	0	5,7	1,59				5,7	45	groß
V.4		400			2,43	1,0	5,7	1,44				5,7	35	mittel
V.5	B 16	300	0,50	2	2,45	2,3	10,2	1,68	10,2	35	sehr groß			
V.6		330		2,46	0,4	5,7	1,57	5,7				25	mittel	
V.7		360		2,49	0	5,7	1,48	5,7				20	gering	
V.8		360		2,54	0	5,7	1,67	5,7				35	mittel	
V.9	B 32	300	0,50	2	2,49	0,9	5,7	1,71	5,7	35	mittel			
V.10		330			2,48	0,4	5,7	1,57				5,7	20	gering
V.11		360			2,50	0	5,7	1,45				5,7	20	gering

Tafel 2 Betonzusammensetzung, Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone der Serie 1, w/z = 0,50

Betón-Nr.	Zuschlaggemisch	Zementgehalt kg/m³	Fasergehalt Vol.-%	Herstellverfahren nach Tafel 4	Rüttelzeit s	Zylinder 15/30 cm			Verdichtungsmaß	28-Tage-Druckprüfung (Verformungsgesteuerter Kurzzeit-Druckversuch) Zylinder 15/30 cm; Mittel aus 3 Werten					Augenscheinliche Beurteilung der Faser- verteilung am Frischbetón (Festbetón s. Abschnitt 4.3.2.3)					
						Auflast kg	Frischbetónroh-dichte kg/dm³	Luftgehalt Vol.-%		Roh-dichte kg/dm³	Druckfestigkeit N/mm²	Längsstauchung		Querdehnung mm/m	Energieaufnahme Joule/cm³Betón	Gleichmäßigkeit	Igelbildung			
												Höchstlast mm/m	30 % Restlast mm/m							
1.1.1	B 8	360	2	2	35	7,4	2,42	2,0	1,59	–	–	–	–	–	–	gut	gering			
1.1.2				3b	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	gering		
1.1.3				4	35	7,4	2,40	2,1	1,57	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	keine	
1.2.1	B 16	330	1	3a	25	7,4	2,43	0,3	1,43	2,40 ¹⁾	47 ¹⁾	2,81 ¹⁾	13,80 ¹⁾	0,96 ¹⁾	0,37	gut	mittel			
1.2.2				3b	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	sehr gering		
1.2.3				4	25	7,4	2,44	0	1,39	2,41	48	2,84	13,86	0,93	0,39	–	–	gut	keine	
1.3.1		330	2	1	–	–	–	–	1,54	–	–	–	–	–	–	schlecht	sehr stark			
1.3.2				2	30	7,4	2,48	0,4	1,57	2,46	50	3,98	23,09	1,70	0,72	mittel	gering			
1.3.3				3b	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	mittel	sehr gering		
1.3.4				4	30	7,4	2,47	0,9	1,53	2,46	49	4,13	26,11	1,70	0,76	–	–	gut	keine	
1.4.1		360	2	2	25	–	2,49	0,1	1,47	–	–	–	–	–	–	gut	gering			
1.4.2				3a	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	mittel	stark		
1.4.3				3b	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	gering	
1.4.4				4	25	–	2,48	0	1,44	2,46	49	3,77	29,24	1,43	0,86	–	–	gut	keine	
1.5.1	B 32	360	2	1	20	–	2,50	0	1,40	–	–	–	–	–	–	schlecht	sehr stark			
1.5.2				2	20	–	2,50	0	1,47	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	gering	
1.5.3				3a	20	–	2,50	0	1,45	2,47	46	3,35	19,42	–	0,51	–	–	mittel	stark	
1.5.4				3b	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	gut	sehr gering
1.5.5				4	20	–	2,49	0	1,43	2,46	48	3,74	27,71	1,28	0,80	–	–	gut	keine	

1) Mittel aus 2 Werten

Tafel 3 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der Betone der Versuchsserie 2

Beton-Nr.	Zuschlag-gemisch	Zement-gehalt kg/m ³	w/z	Faser-gehalt	Frisch-beton-roh-dichte kg/dm ³	Luft-gehalt	Auflast bei Verdichtungs-maß und 20-cm-Würfel kg	Ver-dich-tungs-maß v	Verdichtungsaufwand 20-cm-Würfel	
				Vol.-%		Vol.-%			tatsächlich Rüttelzeit s	erforderlich
2.1	B 8	360	0,50	0	2,36	0,4	—	1,29	30	gering
2.2				1	2,37	1,7	5,7	1,45	35	groß
2.3				2	2,41	2,0	5,7	1,56	35	groß
2.4		400		2	2,43	1,0	5,7	1,44	30	mittel
2.5	B 16	330	0,50	0	2,39	0,3	—	1,30	25	gering
2.6				1	2,43	0,3	—	1,41	25	gering
2.7				1,5	2,43	0,4	—	1,48	25	gering
2.8				2	2,47	0,9	5,7	1,56	25	mittel
2.9		360		0	2,39	0	—	1,19	25	gering
2.10				1	2,42	0	—	1,30	25	gering
2.11				1,5	2,44	0,1	—	1,38	30	gering
2.12				2	2,50	0	—	1,46	30	gering
2.13				3	2,54	0	—	1,67	35	mittel
2.14		B 32		330	0,50	0	2,41	0	—	1,17
2.15	1		2,46			0	—	1,33	25	gering
2.16	2		2,50			0,3	—	1,52	25	gering
2.17	360		0	2,41		0	—	1,06	20	gering
2.18			1	2,47		0	—	1,25	20	gering
2.19			2	2,49		0	—	1,42	25	gering

4 gehen für die Betone der Serie 1 aus Tafel 2, die Frischbetoneigenschaften der Betone der Serie 2 aus Tafel 3 hervor.

4.2.2 *Prüfkörper für die Festbetoneigenschaften*

Art, Abmessungen und Lagerung der Prüfkörper der Serien 1 und 2 sind zusammen mit der Art der Prüfung, der Prüfrichtung sowie Angaben über die Betone, die in die jeweiligen Prüfungen einbezogen wurden, in Tafel 5 zusammengestellt.

Der Beton wurde bei allen Prüfkörpern unter gleichzeitigem Stochern in einer Schicht in die Stahlformen so eingefüllt, daß der Aufsatz etwa zu $\frac{2}{3}$ seiner Höhe gefüllt war, und auf einem Rütteltisch (3000 U/min, Schwingungsbreite 1 mm, Fliehkraft 25 kN) je nach Betonzusammensetzung und Fasergehalt bei den 20-cm-Würfeln und Balken 20/20/90 cm zwischen 20 und 35 Sek., bei den Zylindern 15/30 cm 15 bis 40 Sek. lang gerüttelt (siehe Tafeln 2 und 3). Bei den Betonen 1.3 nach Tafel 2 sowie 2.2 bis 2.4 und 2.8 nach Tafel 3 wurde wegen des höheren erforderlichen Verdichtungsaufwandes eine Auflast verwendet, und zwar bei den 20-cm-Würfeln und beim Verdichtungsmaß eine Auflast von 5,7 kg, bei den Zylindern 15/30 cm von 7,4 kg sowie bei den in Serie 2 hergestellten Balken 20/20/90 cm von 22,8 kg, den stehend hergestellten Balken 15/15/75 cm von 5 kg und den liegend hergestellten Balken 15/15/70 cm von 16,8 kg.

Die in Tafel 5 angegebene Lagerung bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit (r. F.) erfolgt in einem Klimaraum, die bei 20° C und 100 % r. F. in einer Nebelkammer. Die Bohrkerne (Nr. 11 nach Tafel 5), die 15-cm-Würfel (Nr. 8 nach Tafel 5) und die Platten (Nr. 6 und 9 nach Tafel 5) wurden naß herausgebohrt bzw. gesägt. Alle Prüfflächen der Prüfkörper für die Druck-, Spaltzugfestigkeits- und Verformungsprüfungen im Kurzzeit-Druckversuch sowie für das Auszählen der Faserlängen nach dem Meßlinienverfahren (Nr. 6 nach Tafel 5) wurden naß geschliffen, und zwar die der Bohrkerne 10/20 cm, der Würfel aus Balkenreststücken und der Platten nach dem Herausbohren bzw. Heraussägen, die übrigen nach 7 Tagen.

4.3 **Prüfungen und ihre Ergebnisse**

4.3.1 *Frischbeton*

Vom Frischbeton wurde die Beschaffenheit augenscheinlich beurteilt, die Konsistenz mit dem Verdichtungsversuch nach DIN 1048 Teil 1 – bei den Betonen 1.3 der Serie 1 nach Tafel 2 sowie 2.2 bis 2.4 und 2.8 der Serie 2 nach Tafel 3 mit 5,7 kg Auflast –, die Frischbetonrohichte ebenfalls nach DIN 1048 Teil 1 und der Luftgehalt mit Hilfe der Stoffraumrechnung ermittelt sowie bei Serie 2 der für praktisch vollständige Verdichtung der 20-cm-Würfel erforderliche Verdichtungsaufwand abgeschätzt. Die Ergebnisse sind für Serie 1 in Tafel 2 und für Serie 2 in Tafel 3 und in Abschnitt 4.2.1 zusammengestellt.

Die augenscheinliche Beurteilung der Faserverteilung an den nach unterschiedlichen Verfahren hergestellten Frischbetonen der Serie 1 (siehe auch Tafel 2) ergab bei den nach dem Herstellverfahren 1 (Tafel 4) hergestellten Stahlfaserbetonen, bei denen die Fasern ohne vorherige Vereinzelung direkt in den drehenden Mischer ein-

82 Tafel 4 Herstellverfahren bei der Frischbetonherstellung

Verfahren	Mischen und Zugabeverfahren	Dauer in Sekunden bei einem Fasergehalt in Vol.-%			Augenscheinliche Beurteilung der Faserverteilung am Frischbeton
		1	2	3	
1	– Zugabe von Zuschlag, Zement, Wasser	–	–	–	Fasern ungleichmäßig eingemischt, sehr zahlreiche feste Igel
	– Einschütten der Fasern in Teilmengen zu je 5 kg in die mit Mischgeschwindigkeit drehende Mischertrommel	–	30	–	
	– Nachmischen nach Faserzugabe	–	40	–	
	Gesamtmischdauer	–	70	–	
2	– Mischen von Zuschlag, Zement, Wasser	30	30	30	Fasern weitgehend gleichmäßig verteilt und eingemischt, mit wachsendem Faser- gehalt und längerer Mischdauer anstei- gende, insgesamt geringe bis mittlere Anzahl fester Igel
	– Einrieseln der Fasern in Teilmengen über ein von Hand bewegtes Sieb 31,5 mm in die mit Mischgeschwindigkeit drehende Mischertrommel durch die Einfüllöffnung	50	100	150	
	– Nachmischen nach Faserzugabe	30	30	30	
	Gesamtmischdauer	110	160	210	

Tafel 4 (Fortsetzung)

Verfahren	Mischen und Zugabeverfahren	Dauer in Sekunden bei einem Fasergehalt in Vol.-%			Augenscheinliche Beurteilung der Faserverteilung am Frischbeton
		1	2	3	
3 a	<ul style="list-style-type: none"> – Mischen von Zuschlag, Zement, Wasser – Einrieseln der Fasern in 3 gleichen Teilmengen über ein Sieb (s. Verfahren 2) in die offene, von Hand langsam gedrehte Mischertrommel; nach jeder Teilmenge zwischengemischt – Mischen zwischen der Zugabe der Teilmengen – Nachmischen nach Faserzugabe Gesamtmischdauer 	30 beliebig	30 beliebig	– –	Fasern ungleichmäßig verteilt und schlecht eingemischt, zahlreiche feste Igel
		jeweils 15 15 (30) ¹⁾ 75 (90) ¹⁾	jeweils 15 15 (30) ¹⁾ 75 (90) ¹⁾	– – –	
		wie Verfahren 3 a			
4	<ul style="list-style-type: none"> – Mischen von Zuschlag, Zement, Wasser – Einrieseln der Fasern kontinuierlich über eine Zugabeeinrichtung nach Bild 1 mit Rüttelsieb 31,5 mm (Außenrüttler, Masse 3 kg, 2500 U/min, Schwingungsbreite 1 mm, Fliehkraft 400 N) durch die Einfüllöffnung in die mit Mischgeschwindigkeit drehende Mischertrommel – Nachmischen nach Faserzugabe Gesamtmischdauer 	30 45	30 60	– –	Fasern gleichmäßig verteilt und eingemischt, keine Igel
		30 105	30 120	– –	

¹⁾ orientierend bei einigen Betonen

Tafel 5 Prüfkörper, Lagerung der Prüfkörper, Prüfungen und geprüfte Betone der Serie 2

Serie	Lfd. Nr.	Prüfkörper	Lagerung	Prüfungen		Geprüfte Betone
				Art	Prüfrichtung	
1		Alle Prüfkörper				
	1	Würfel 20/20/20 cm daraus nach ca. 14 Tagen naß herausgesägt nach Bild 2	Bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern An Luft bei 20 °C; bis 7. Tag 100 % rel. Luft- feuchte (r. F.), danach bis zum Sägen 65 % r. F.	Augenscheinliche Beurtei- lung der Faserverteilung —		Alle Betone nach Tafel 2
	2	Platten 20/20/2 cm	Raumklima	Röntgenaufnahmen	Platten A und B nach Bild 2	Betone 1.4.2, 1.5.3 nach Tafel 2 Siehe Tafel 2
3	Zylinder d = 15 cm, h = 30 cm	An Luft bei 20 °C; bis 7. Tag 100 % r. F., bis 28. Tag 65 % r. F.	Verformungen und Druckfestigkeit bei ver- formungsgesteuerter Kurz- zeit-Druckprüfung nach 28 Tagen, Rohdichte	In Betonierrichtung		

Tafel 5 (Fortsetzung)

Serie	Lfd. Nr.	Prüfkorper	Lagerung	Prüfungen		Geprüfte Betone
				Art	Prüfrichtung	
2		Alle Prüfkorper	Bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern	Augenscheinliche Beurteilung der Faserverteilung und -orientierung, Betonrohddichte nach DIN 1048 vor der Prüfung Wie Lfd. Nr. 3	—	
	4	Zylinder d = 15 cm, h = 30 cm	Wie Lfd. Nr. 3	Wie Lfd. Nr. 3	In Betonierrichtung	Betone der Serie 2 außer 2.4, 2.13, 2.18
	5	Würfel 20/20/20 cm	Druckfestigkeit wie Lfd. Nr. 3, Spaltzugfestigkeit 20 °C und 100 % r. F. bis 28. Tag	28-Tage-Druck- und Spaltzugfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048	Druckbelastung in und senkrecht zur Betonierrichtung, Spaltzugbelastung in Betonierrichtung	Betone der Serie 2 außer 2.4 und 2.13 Siehe Tafel 6
	6	Platten 20/20/2 cm naß herausgesägt aus 20-cm-Würfeln wie Lfd. Nr. 1	Raumklima	Röntgenaufnahmen Auszählen der Fasersehnenlänge	Platten A und B nach Bild 2	Betone nach Bild 7 Betone nach Tafel 10
	7	Balken 15/15/70 cm liegend betoniert und 15/15/75 cm stehend betoniert.	An Luft bei 20 °C und 100 % r. F. bis 28. Tag	28-Tage-Biegezugfestigkeit mit Dreipunktbelastung nach DIN 1048	—	Siehe Tafel 7
	8	Würfel 15/15/15 cm aus den Reststücken der Biegezugprüfung nach Lfd. Nr. 7 naß herausgesägt	An Luft bei 20 °C und 65 % r. F. bis 35. Tag	35-Tage-Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048	In und quer zur Balkenlängsrichtung, bei liegend betonierten Balken Querrichtung = senkrecht zur Betonierrichtung	Siehe Tafel 7
	9	Platten 15/15/1,5 cm naß herausgesägt aus 15-cm-Würfeln aus nicht auf Festigkeit geprüften Balken wie Lfd. Nr. 7	Raumklima	Röntgenaufnahmen	Platten aus Würfeln der stehend betonierten Balken entspr. Platten A und B nach Bild 2, aus liegend hergestellten Balken siehe Bild 11	Betone 2.10 und 2.15 nach Tafel 3
	10	Balken 20/20/90 cm liegend betoniert	An Luft bei 20 °C und 100 % r. F. bis zum Bohren	—	—	
	11	Bohrkerne d = 10 cm, h = 20 cm aus den Balken Lfd. Nr. 10 nach 7 bis 10 Tagen naß herausgebohrt	An Luft bei 20 °C und 65 % r. F. bis zum 28. Tag	Verformungen und Druckfestigkeit bei verformungs-gesteuerter Kurzzeit-Druckprüfung nach 28 Tagen; 28-Tage-Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048	In und senkrecht zur Betonierrichtung nach Bild 3	Betone der Serie 2 außer 2.7, 2.11, 2.13

geschüttet wurden, eine sehr ungleichmäßige Faserverteilung mit zahlreichen festen, teilweise mit Mörtel durchzogenen Faserkonzentrationen (Igel) mit einem Durchmesser bis zu rd. 5 cm, die auch mit einem Spaten nur schwer aufgelöst werden konnten. Beim Verfahren 2 (Tafel 4), bei dem die Fasern über ein von Hand bewegtes Sieb vereinzelt in den Mischer eingerieselt wurden, waren die Fasern unmittelbar nach dem Einrieseln zunächst weitgehend verteilt eingemischt. Mit längerer Einschüttzeit bei laufendem Mischer (zwischen 50 Sekunden bei 1 Vol-% und 150 Sekunden bei 3 Vol-% Fasern) bildeten sich aber auch noch solche Faserkonzentrationen, deren Zahl insgesamt zwar geringer war als beim Verfahren 1, aber mit zunehmendem Fasergehalt anstieg. Beim Verfahren 3 (Tafel 4) trat eine nennenswerte Igelbildung nur auf, wenn der Beton nach dem Vormischen der Ausgangsstoffe und dem wiederholten Zwischenmischen nach Zugabe der Teilmengen an Fasern jeweils überwiegend am Rand der Mischertrommel lag und so Fasern auch in den vom Beton freien Teil der Mischertrommel im Bereich des mittig im Mischerdeckel angebrachten Rührwerkzeugs fielen, wo sie sich verhakten und zusammenballten (Verfahren 3 a nach Tafel 4). Wurde der Beton dagegen nach den einzelnen Mischphasen gleichmäßig über die Mischertrommel verteilt (Verfahren 3 b nach Tafel 4) und die Fasern dann gleichmäßig auf den Beton aufgestreut und eingemischt, so traten bei lediglich orientierenden Feststellungen an den Betonen 1.2.2 und 1.4.3 der Serie 1 nur bei Nachmisch-



Bild 1 Zugabeeinrichtung für gleichmäßige Verteilung der Stahlfasern, Herstellverfahren 4 nach Tafel 4

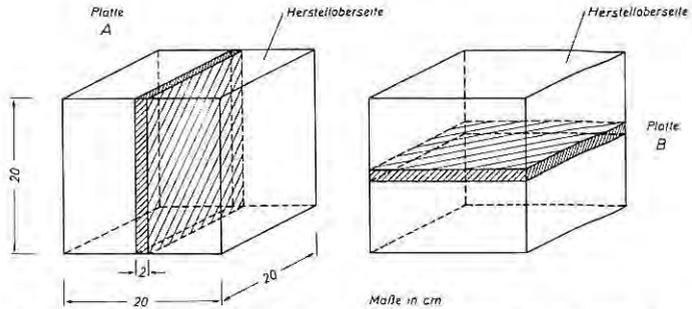


Bild 2 Lage der Platten 20/20/2 cm in 20-cm-Würfeln nach Tafel 5 für Röntgenaufnahmen und zur Bestimmung der Fasersehnenlängen mit dem Meßlinienverfahren

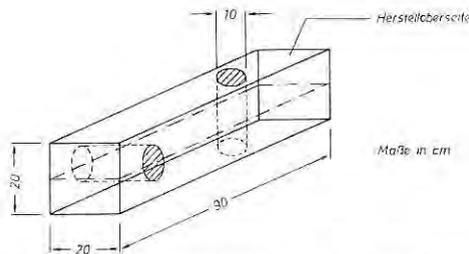


Bild 3 Lage der Bohrkern $d = 10$ cm, $h = 20$ cm nach Tafel 5 in liegend hergestellten Balken 20/20/90 cm

zeiten von 30 Sekunden und mehr nach Zugabe aller Fasern einzelne, aber überwiegend sehr lockere und nicht mit Mörtel durchzogene Faserkonzentrationen auf, die sehr leicht aufzulösen waren. Die Fasern waren insgesamt bei diesem Verfahren nahezu gleichmäßig verteilt, das Verfahren ist jedoch zu aufwendig und unpraktikabel. Beim Verfahren 4 (Tafel 4) mit kontinuierlicher Zugabe der Fasern über ein Rüttelsieb (siehe Bild 1) waren die Fasern unabhängig von der Zusammensetzung der Betone und dem jeweiligen Fasergehalt immer augenscheinlich ausreichend gleichmäßig verteilt und untergemischt. Faserkonzentrationen (Igel) wurden nicht festgestellt. Diese Feststellungen wurden auch bei den Versuchen der Serie 2 bestätigt.

4.3.2 Festbeton

Art und Umfang der am Festbeton durchgeführten Prüfungen sind in Tafel 5 zusammengestellt. Bei allen Betonen wurden darüber hinaus die Gefügebeschaffenheit sowie die Verteilung und Orientierung der Fasern (siehe Abschn. 4.3.2.3) an den entschalteten Flächen sowie an den Schnitt- und Bruchflächen der Festbeton-Prüfkörper augenscheinlich beurteilt. Alle Prüfkörper, mit Ausnahme des Betons 2.3 mit einigen größeren Verdichtungsstellen, wiesen ein dichtes Gefüge auf.

Tafel 6 Rohdichten (ρ), Druckfestigkeiten (β_w , β_B) und Spaltzugfestigkeiten (β_{sz}) sowie Standardabweichungen (s) der Betone der Serie 2 im Alter von 28 Tagen

Beton nach Tafel 3	Druckfestigkeit in N/mm ²												Spaltzugfestigkeit in N/mm ² 20-cm-Würfel Mittel aus 5 Prüfkörpern Belastung in Betonierrichtung		
	20-cm-Würfel Mittel aus 5 Prüfkörpern						Bohrkerne 10x20 cm Mittel aus 5 Prüfkörpern								
	Belastung in Betonierrichtung			Belastung senkrecht zur Betonierrichtung			in Betonierrichtung			gebohrt und belastet senkrecht zur Betonierrichtung					
	ρ kg/dm ³	β_w	s	ρ kg/dm ³	β_w	s	ρ kg/dm ³	β_B	s	ρ kg/dm ³	β_B	s	ρ kg/dm ³	β_{sz}	s
2.1	2,36	55	2,0	2,33	54	1,6	2,29	37	1,0	2,30	42	1,2	2,37	3,3	0,35
2.2	2,35	53	1,9	2,34	53	2,4	2,31	39	2,0	2,30	39	2,0	—	—	—
2.3	2,39	58	1,1	2,40	57	1,2	2,37	42	1,7	2,38	41	1,2	2,44	3,8	0,52
2.4	—	—	—	—	—	—	2,37	42	1,2	2,36	38	2,9	2,47	5,5 ¹⁾	0,24
2.5	2,39	53	3,3	2,37	54	1,6	2,32	37	1,0	2,33	38	1,0	2,41	3,5	0,18
2.6	2,44	59	2,2	2,42	56	0,8	2,38	43	2,3	2,40	42	1,0	2,45	3,7	0,14
2.7	2,43	60	1,9	2,42	59	1,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.8	2,48	64	1,8	2,47	62	1,8	2,40	47	4,0	2,42	40	0,6	—	—	—
2.9	2,38	53	1,1	2,38	54	1,3	2,33	38	1,7	2,36	40	1,0	2,40	3,4	0,13
2.10	2,38	56	1,5	2,38	55	1,5	2,35	40	2,7	2,37	41	0,6	—	—	—
2.11	2,44	60	2,7	2,42	57	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.12	2,48	64	3,7	2,46	60	1,6	2,42	45	0,0	2,44	38	0,6	2,49	3,8	0,25
2.14	2,40	54	1,3	2,39	52	0,8	2,36	36	1,0	2,37	38	1,7	2,43	3,1	0,11
2.15	2,46	62	2,0	2,44	58	0,9	2,41	39	1,2	2,42	39	2,1	2,47	3,4	0,25
2.16	2,50	64	2,6	2,48	60	1,6	2,46	49	1,2	2,45	38	2,1	2,48	3,9	0,12
2.17	2,38	52	1,5	2,38	52	1,1	2,38	38	2,1	2,36	38	0,6	2,41	3,1	0,14
2.18	2,46	59	1,1	2,45	57	1,3	2,42	38	1,2	2,43	38	1,0	—	—	—
2.19	2,48	65	1,3	2,49	59	1,9	2,46	42	1,0	2,47	37	0,0	2,50	4,3	0,28

1) Bohrkerne 10x20 cm, nach Bild 3 parallel zur Herstellerseite gebohrt

4.3.2.1 Festigkeiten

Die Druckfestigkeiten der in und senkrecht zur Herstellrichtung belasteten 20-cm-Würfel und der aus Balken 20/20/90 cm nach Bild 3 in und senkrecht zur Herstellrichtung naß herausgesägten Bohrkerne 10/20 cm sowie die an 20-cm-Würfeln mit Belastung in Herstellrichtung ermittelten Spaltzugfestigkeiten sind in Tafel 6, die an liegend (15/15/70 cm) und stehend (15/15/75 cm) hergestellten Balken ermittelten Biegezugfestigkeiten zusammen mit den Druckfestigkeiten der nach der Biegezugprüfung aus den Balkenreststücken herausgesägten und in und quer zur Balkenlängsachse belasteten 15-cm-Würfel in Tafel 7 zusammengestellt. Die Rohdichten vor der Prüfung sind jeweils mit aufgeführt. Die Prüfungen entsprachen, abgesehen von den unterschiedlichen Belastungsrichtungen der Würfel bei der Druckprüfung und den bei der Spaltzugfestigkeit verwendeten Lastverteilungstreifen aus Stahl, der DIN 1048. Die nach DIN 1048 vorgesehenen Lastverteilungstreifen aus Hartfilz oder Hartfaser erwiesen sich als nicht geeignet, da sich die Stahlfasern hineinbohrten und da sie bei sehr hohen Bruchlasten zerquetscht wurden.

4.3.2.2 Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten der in Tafel 2 angegebenen und nach unterschiedlichen Verfahren mit gleichmäßiger und ungleichmäßiger Faserverteilung hergestellten Betone der Serie 1 und die Verbesserung des Verformungsverhaltens durch Stahlfasern bei herstellbedingt immer gleicher Faserorientierung in den Prüfkörpern der Serie 2 wurden an Zylindern 15/30 cm, die durch Faserorientierung hervorgerufenen Unterschiede im Verformungsverhalten an den gem. Tafel 5 aus Balken in und senkrecht zur Herstellrichtung gebohrten Bohrkernen 10/20 cm der Serie 2 jeweils im verformungsgesteuerten Kurzzeit-Druckversuch ermittelt. Dabei wurden die Prüfkörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 2% je Minute verformt, die mit Hilfe von drei induktiven Weggebern über den Druckplattenabstand gesteuert wurde. Die Längsstauchungen und Querdehnungen wurden in der Regel bis zum Erreichen der Höchstlast mit Hilfe von jeweils zwei, mit einem 2-Komponenten-Schnellklebstoff (Hottinger X 60) an zwei gegenüberliegenden Seiten mittig längs und quer auf die Prüfzylinder aufgeklebten, 15 cm langen Dehnungsmeßstreifen ermittelt. Der Druckversuch wurde über die Höchstlast hinaus bis zum Wiederabfall der Druckspannung auf 30 % der Höchstlast weitergeführt, wobei die Längsstauchung nach Überschreiten der Höchstlast mit Hilfe der Weggeber aufgezeichnet wurde. Die Verformungswerte der Versuchssteuerung, die Druckbelastungen und die mit den Dehnungsmeßstreifen ermittelten Verformungsergebnisse wurden auf Lochstreifen und auf Magnetband registriert und mit einem Rechner ausgewertet. Die Energieaufnahme, dargestellt durch die Fläche unter dem σ - ϵ_D -Diagramm, wurde nach der Gleichung ermittelt:

$$\text{Energie} = \int_0^{\epsilon_{D\max} \text{ bei } 30\% \text{ Restdruckspannung}} \sigma \cdot d\epsilon_D$$

Die wichtigsten zahlenmäßigen Ergebnisse der Verformungsmessungen der Serie 1 sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die Druckfe-

Tafel 7 Rohdichten (ρ), Biegezugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen (β_{Bz}) und Druckfestigkeiten (β_w) im Alter von 35 Tagen der Serie 2

Beton nach Tafel 3	Balken 15 cm/15 cm/70 cm, liegend hergestellt								Balken 15 cm/15 cm/75 cm, stehend hergestellt								Verhältnis Biegezug- festigkeit liegend/ stehend hergestell- ter Balken
	Biegezugprüfung Mittel aus 4 Balken		Druckprüfung 15-cm-Würfel, Mittel aus n Würfeln Belastung						Biegezugprüfung Mittel aus 4 Balken		Druckprüfung 15-cm-Würfel, Mittel aus n Würfeln Belastung						
			in Balkenlängs- richtung			in Balkenquer- richtung					in Balkenlängs- richtung			in Balkenquer- richtung			
	ρ kg/dm ³	β_{Bz} N/mm ²	n	ρ kg/dm ³	β_w N/mm ²	n	ρ kg/dm ³	β_w N/mm ²	ρ kg/dm ³	β_{Bz} N/mm ²	n	ρ kg/dm ³	β_w N/mm ²	n	ρ kg/dm ³	β_w N/mm ²	
2.4	2,43	8,2	–	–	–	–	–	–	2,44	6,1	–	–	–	–	–	–	1,3
2.9	2,34	6,2	5	2,35	53	4	2,35	53	2,36	6,2	4	2,36	55	5	2,35	53	1,0
2.10	2,43	7,0	4	2,40	56	5	2,39	59	2,42	6,2	4	2,42	59	4	2,41	54	1,1
2.12	2,48	8,0	4	2,46	57	4	2,46	62	2,49	5,3	4	2,47	72	4	2,45	66	1,5
2.13	2,54	11,1	4	2,50	57	5	2,53	64	2,53	5,8	4	2,52	79	4	2,53	68	1,9
2.19	2,49	7,2	–	–	–	–	–	–	2,52	4,8	–	–	–	–	–	–	1,5

Tafel 8 Ergebnisse der Verformungsmessungen beim Kurzzeit-Druckversuch der Betone der Serie 2
(Mittel aus 5 Prüfzylindern d = 15 cm, h = 30 cm), Prüfung in Betonierichtung

Beton nach Tafel 3	Rohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²	Längsstauchung in mm/m bei % der Druckfestigkeit DMS							Querdehnung in mm/m bei % der Druckfestigkeit DMS				max. Volumenverringerng bei % der Druckfestigkeit	$\frac{\Delta V}{V}$ ‰	Energieaufnahme Joule/cm ³ Beton
			30	50	80	98	100	Wegaufnehmer		30	50	80	98			
									- 30 (E _{Dmax})							
2.1	2,32	45	0,38	0,67	1,20	1,73	1,92	2,30	5,00	0,07	0,12	0,25	0,59	90	0,75	0,14
2.2	2,37	44	0,39	0,67	1,23	1,91	2,29	2,76	12,62	0,06	0,11	0,28	0,87	85	0,59	0,30
2.3	2,40	46	0,40	0,70	1,32	2,34	2,82	3,50	27,29	0,07	0,14	0,32	1,29	83	0,69	0,74
2.4	2,42	46	0,44	0,79	1,55	—	—	4,68	27,51	—	—	—	—	—	—	0,73
2.5	2,35	45	0,36	0,64	1,13	1,59	1,72	2,27	4,60	0,06	0,10	0,21	0,51	89	0,71	0,12
2.6	2,40	48	0,40	0,70	1,28	1,87	2,32	2,84	13,86	0,06	0,12	0,28	0,93	82	0,73	0,39
2.7	2,42	48	0,41	0,73	1,35	1,97	2,59	3,20	20,66	0,06	0,12	0,29	1,01	85	0,76	0,59
2.8	2,44	49	0,43	0,76	1,46	2,54	—	4,48	26,11	0,07	0,13	0,34	1,70	81	0,80	0,76
2.9	2,36	38	0,33	0,57	1,00	1,42	1,53	2,06	4,75	0,05	0,10	0,19	0,45	89	0,66	0,11
2.10	2,39	44	0,38	0,66	1,17	1,75	2,02	2,30	11,36	0,06	0,10	0,21	0,54	90	0,78	0,30
2.11	2,42	46	0,38	0,67	1,21	1,86	2,20	2,55	17,27	0,06	0,12	0,25	1,01	89	0,77	0,40
2.12	2,46	49	0,45	0,79	1,50	2,48	2,86	4,00	29,24	0,08	0,14	0,35	1,43	81	0,79	0,86
2.14	2,39	38	0,29	0,51	0,88	1,28	1,58	2,07	4,69	0,05	0,09	0,25	0,51	86	0,52	0,11
2.15	2,44	45	0,36	0,64	1,15	1,76	2,02	2,57	13,37	0,06	0,12	0,28	0,89	81	0,60	0,35
2.16	2,47	48	0,42	0,74	1,33	2,19	—	3,91	26,63	0,06	0,12	0,31	1,44	82	0,76	0,81
2.17	2,38	36	0,31	0,55	0,96	1,35	1,59	1,95	4,76	0,05	0,09	0,19	0,53	85	0,64	0,11
2.19	2,46	48	0,42	0,75	1,43	2,48	2,91 ¹⁾	3,74	27,71	0,07	0,13	0,35	1,26	82	0,77	0,80

1) Einzelwert

Tafel 9 A Ergebnisse der Verformungsmessungen beim Kurzzeit-Druckversuch der Betone der Serie 2
(Mittel aus 3 Bohrkernen $d = 10 \text{ cm}$, $h = 20 \text{ cm}$; Entnahme und Prüfung in Betonierrichtung)

Beton nach Tafel 3	Rohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²	Längsstauchung in mm/m bei % der Druckfestigkeit								Querdehnung in mm/m (DMS)					max. Volumenverringerung bei % der Druckfestigkeit	Energieaufnahme Joule/cm ³ Beton			
			DMS					Wegaufnehmer - 30 (ϵ_{Dmax})			bei % der Druckfestigkeit				ϵ_{max} gemessen			bei % der Druckfestigkeit	bei % der Druckfestigkeit	$\frac{\Delta V}{V}$ ‰
			30	50	80	98	100	100	30	50	80	98								
2.1	2,29	36	0,35	0,60	1,08	1,59	1,79	2,24	6,29	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15		
2.2	2,31	37	0,38	0,65	1,17	1,75	2,20	3,10	17,95	0,05	0,13	0,25	0,74	1,56	100	89	0,76	0,40		
2.3	2,37	41	0,43	0,77	1,54	3,21	3,93	5,01	26,40	0,07	0,14	0,32	2,02	3,57 ¹⁾	100	82	0,96	0,74		
2.4	2,38	41	0,47	0,85	1,81	3,94	4,43	5,67	33,31	0,06	0,14	0,52	3,31 ¹⁾	3,99 ¹⁾	99	75	0,85	0,83		
2.5	2,32	36	0,30	0,54	0,99	1,46	1,60	2,37	6,49	—	—	—	—	—	—	—	—	0,14		
2.6	2,38	41	0,36	0,65	1,23	2,11	2,53	3,22	19,81	0,12	0,11	0,24	0,99	1,98	100	90	0,84	0,52		
2.8	2,40	42	0,43	0,75	1,43	2,90	3,96	4,60	30,60	0,09	0,13	0,34	1,52	1,97	99	85	1,01	0,80		
2.9	2,34	37	0,34	0,59	1,05	1,52	1,69	2,10	6,16	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15		
2.10	2,36	39	0,37	0,67	1,26	2,17	2,75	3,59	18,46	—	—	—	—	—	—	—	—	0,46		
2.12	2,42	43	0,39	0,71	1,46	3,01	3,54	4,64	43,28	—	—	—	—	—	—	—	—	1,09		
2.14	2,36	35	0,26	0,44	0,78	1,19	—	2,45	7,07	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15		
2.15	2,41	37	0,28	0,50	0,96	1,61	2,32	3,57	16,68	0,03	0,10	0,29 ¹⁾	—	0,44	85	78	0,69	0,37		
2.16	2,45	46	0,45	0,83	1,81	3,53	—	4,72	30,16	0,14	0,15	0,60	2,22	3,20 ¹⁾	100	75	0,76	0,88		
2.17	2,38	39	0,32	0,54	0,94	1,38	1,52	2,38	6,28	—	—	—	—	—	—	—	—	0,15		
2.18	2,42	38	0,37	0,64	1,21	2,05	2,39	3,29	18,28	—	—	—	—	—	—	—	—	0,41		
2.19	2,46	41	0,45	0,80	1,68	3,11	3,77	5,09	43,41	—	—	—	—	—	—	—	—	1,08		

1) Mittelwert aus 2 Werten

Tafel 9B Ergebnisse der Verformungsmessungen beim Kurzzeit-Druckversuch der Betone der Serie 2
(Mittel aus 3 Bohrkernen d = 10 cm, h = 20 cm; Entnahme senkrecht zur Betonierichtung)

Beton nach Tafel 3	Rohdichte kg/dm ³	Druckfestigkeit N/mm ²	Längsstauchung in mm/m bei % der Druckfestigkeit							Querdehnung in mm/m (DMS)					max. Volumenverringering bei % der Druckfestigkeit	$\frac{\Delta V}{V}$ ‰	Energieaufnahme Joule/cm ³ Beton	
			DMS			Wegaufnehmer				bei % der Druckfestigkeit				ϵ_{\max} gemessen				
			30	50	80	98	100	100	- 30 ($\epsilon_{D\max}$)	30	50	80	98					bei % der Druckfestigkeit
2.1	2,30	41	0,40	0,71	1,33	2,10	2,40	2,50	6,49	-	-	-	-	-	-	-	-	0,17
2.2	2,30	38	0,41	0,69	1,23	1,97	2,56	2,98	13,50	0,05	0,10	0,24	0,86	1,78	100	86	0,80	0,32
2.3	2,38	39	0,38	0,66	1,20	1,89	2,28	2,65	12,15	0,07	0,12	0,27	0,88	1,62	100	85	0,67	0,30
2.4	2,37	37	0,41	0,72	1,39	2,25	2,83	3,95	17,80	0,07	0,13	0,32	1,44	2,34	100	80	0,76	0,39
2.5	2,33	35	0,31	0,54	0,99	1,53	1,74	2,47	7,03	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16
2.6	2,39	40	0,35	0,61	1,10	1,77	2,14	2,70	14,14	0,12	0,21	0,40	1,06	2,22	100	85	0,60	0,34
2.8	2,41	39	0,34	0,61	1,13	1,87	2,42	2,96	18,80	0,09	0,26	0,39	1,46	1,32	99	75	0,37	0,43
2.9	2,36	40	0,38	0,66	1,21	-	-	2,52	7,09	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18
2.10	2,37	39	0,39	0,67	1,21	1,99	2,43	3,06	14,76	-	-	-	-	-	-	-	-	0,36
2.12	2,43	37	0,37	0,64	1,20	2,04	2,56	3,51	26,72	-	-	-	-	-	-	-	-	0,55
2.14	2,37	36	0,31	0,53	0,97	1,48	1,68	2,39	6,98	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15
2.15	2,42	38	0,36	0,62	1,12	1,79	2,07	3,01	17,27	0,03	0,20	0,40	-	1,16	100	90	1,00	0,38
2.16	2,46	38	0,40	0,68	1,18	1,86	2,23	3,00	18,12	0,14	0,27	0,59	-	1,64	96	50	0,29	0,40
2.17	2,37	37	0,33	0,57	1,03	1,53	1,72	2,43	6,62	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15
2.18	2,43	39	0,30	0,59	0,96	1,68	2,19	2,72	16,86	-	-	-	-	-	-	-	-	0,35
2.19	2,47	37	0,32	0,57	1,11	2,09	2,48	3,31	24,69	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50

stigkeit sowie die wichtigsten Kenndaten der Längsstauchungen, Querdehnungen sowie die maximale Volumenverringering und die errechneten Energieaufnahmen sind für die Serie 2 getrennt nach den Zylindern 15/30 cm in Tafel 8 sowie für die in Herstellungsrichtung gebohrten Bohrkern in Tafel 9 A und für die senkrecht dazu gebohrten Bohrkern in Tafel 9 B jeweils zusammen mit den Rohdichten vor der Prüfung zusammengestellt.

4.3.2.3 Faserverteilung und Faserorientierung

Soweit möglich wurden die Verteilung und die Orientierung der Stahlfasern im erhärteten Beton augenscheinlich an allen Bruch- und Schnittflächen der Prüfkörper der Betone untersucht und beurteilt. Für die Faserverteilung bestätigte diese augenscheinliche Beurteilung die bereits am Frischbeton getroffenen Feststellungen, siehe Abschnitt 4.3.1. Die augenscheinliche Untersuchung der Faserorientierung ließ bereits erkennen, daß die Stahlfasern vorwiegend senkrecht zur Betonierichtung orientiert sind, siehe z. B. die Bruchflächen der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfkörper auf den Bildern 4 und 5. Diese Feststellung traf, wenn auch unterschiedlich deutlich erkennbar, auch für die Prüfkörper der übrigen Betone zu.

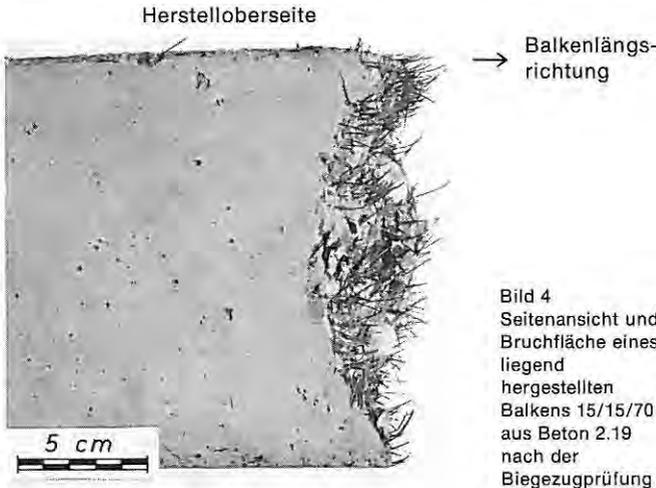


Bild 4
Seitenansicht und
Bruchfläche eines
liegend
hergestellten
Balkens 15/15/70 cm
aus Beton 2.19
nach der
Biegezugprüfung

Um einen weiteren Aufschluß über die Faserorientierung zu bekommen, wurden aus den 20-cm-Würfeln der Stahlfaserbetone 1.4.2 und 1.5.3 der Serie 1 (Tafel 2) und der in Bild 6 angegebenen Stahlfaserbetone der Serie 2 (siehe auch Tafel 3) Platten 20/20/2 cm (Tafel 5, Spalte 6) in den Richtungen A und B nach Bild 2 und zusätzlich aus 15-cm-Würfeln der liegend hergestellten Balken 15/15/70 cm und der stehend hergestellten Balken 15/15/75 cm der Stahlfaserbetone 2.10 und 2.15 (Tafel 3) in Richtung A und B nach Bild 2 Platten 15/15/1,5 cm (Tafel 5, Spalte 9) naß herausgesägt und

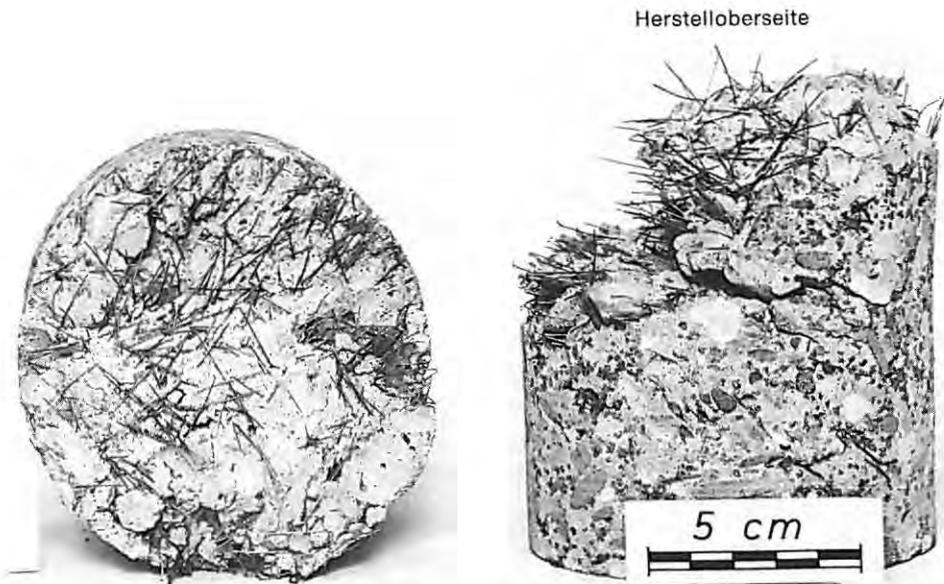


Bild 5 Aufsicht und Seitenansicht quer zur Balkenlängsachse eines nach Bild 3 in Betonierichtung herausgebohrten und belasteten Bohrkerns des Betons 2.8

geröntgt. Die Feststellungen zur Faserorientierung sind für die Platten 20/20/2 cm der untersuchten Stahlfaserbetone der Serie 2 schematisch in Bild 6 und für einige Prüfplatten der Stahlfaserbetone 1.4.2, 2.8, 2.16, 2.3 und 2.10 als Kopien von Röntgenaufnahmen in den Bildern 7 bis 12 als Beispiel dargestellt. Die Feststellungen über die Faserorientierung der übrigen Stahlfaserbeton-Platten stimmen mit den wiedergegebenen Ergebnissen überein. Bild 7 zeigt außerdem als Beispiel, daß der Stahlfaserbeton 1.4.2 (Tafel 2) starke Faserkonzentrationen (sog. Igelbildung) und damit ungleichmäßige Faserverteilung aufweist.

Zur Erhärtung der augenscheinlichen Beurteilung der Röntgenaufnahmen wurden an den zuvor geröntgten Platten 20/20/2 cm einiger Stahlfaserbetone der Serie 2 die sichtbaren Faseranteile mikroskopisch mit Hilfe des für die Bestimmung der Porenverteilung am Festbeton verwendeten Meßlinienverfahrens [13] ausgemessen. Hierzu wurden beide Flächen dieser Platten mit einem Meßlinienraster gemäß Bild 13 versehen, das sichtbare Fasern längs, quer oder schräg schnitt. Die auf den Meßlinien liegenden sichtbaren Stahlfaserstrecken wurden nach [13] bestimmt, ihre Summe nach [13] ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Bestimmung ließen zwar den Trend der Faserorientierung senkrecht zur Betonierichtung in den Platten A erkennen, eine quantitative Aussage war jedoch wegen der großen Streuungen nicht möglich.

Beton nach Tafel 3	Platte nach Bild 2		Grad der Orientierung bei Platte A
	A	B	
2.2			<i>Orientierung nur am unteren Rand, dort deutlich</i>
2.3			<i>schwach</i>
2.7			<i>wie 2.2</i>
2.8			<i>deutlich</i>
2.10			<i>schwach</i>
2.11			<i>in den unteren Bereichen deutlich</i>
2.12			<i>schwach</i>
2.15			<i>wie 2.2</i>
2.16			<i>deutlich</i>
2.19			<i>schwach</i>
<u>Orientierung der Fasern</u>			
<i>Überwiegend parallel zur Herstelloberseite</i> <i>Ohne bestimmte Orientierung</i> <i>Teilweise parallel, teilweise senkrecht zur Herstelloberseite</i>			

Bild 6 Schematische Darstellung und Grad der Orientierung der an Röntgen-
aufnahmen augenscheinlich festgestellten Faserorientierung (Platten
A und B nach Bild 2 von Betonen der Serie 2)

Herstelloberseite



Bild 7 Faserverteilung beim Herstellverfahren 3a nach Tafel 4 (Platte A nach Bild 2 aus Beton 1.4.2)

Herstelloberseite



Bild 8 Orientierung der Stahlfasern parallel zur Herstelloberseite (Platte A nach Bild 2 aus Beton 2.8)

Herstelloberseite



Bild 9 Orientierung der Stahlfasern parallel zur Herstelloberseite (Platte A nach Bild 2 aus Beton 2.16)

Seitenfläche



Bild 10 Faserverteilung ohne Orientierung (Platte B nach Bild 2 aus Beton 2.3)

5. Erörterung der Versuchsergebnisse

5.1 Frischbetoneigenschaften

5.1.1. Verarbeitbarkeit

Wie zu erwarten, wurde die Verarbeitbarkeit der Stahlfaserbetone bei gleichen Betonausgangsstoffen im untersuchten Bereich mit wachsendem Zementleimanteil, mit zunehmendem Größtkorn des

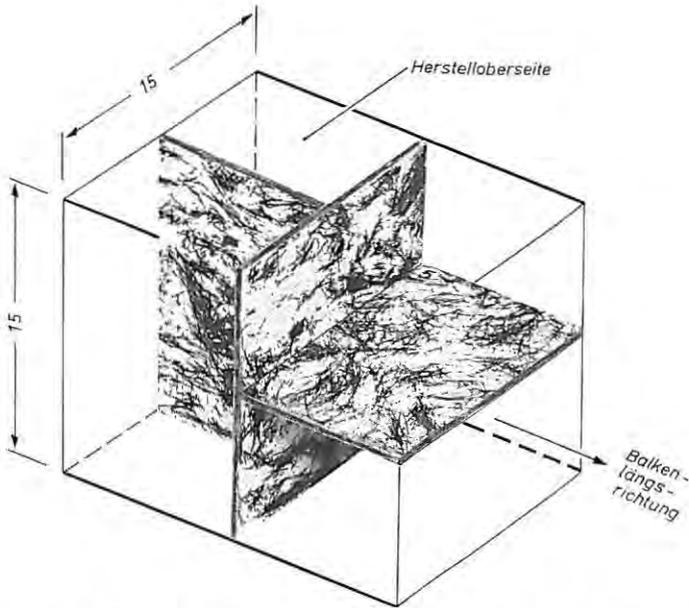


Bild 11 Lage der Platten nach Tafel 5 und Orientierung der Fasern im Mittelbereich eines liegend betonierten Balkens 15/15/70 cm aus Beton 2.10

Kiessandgemisches und mit abnehmendem Fasergehalt besser. Die Verdichtungsmaße lagen bei den Nullbetonen zwischen 1,06 und 1,30 und bei den Stahlfaserbetonen der Hauptversuche zwischen 1,25 und 1,67. Der Luftgehalt des Frischbetons lag bei den Hauptversuchen zwischen 0 und 2,0 Vol.-%. Wie ein Vergleich der Verdichtungsmaße zeigt (siehe Tafeln 1 bis 3), ist das Verdichtungsmaß in dem ansonsten dafür geeigneten Konsistenzbereich für Stahlfaserbetone unterschiedlicher Zusammensetzung (Zementgehalt, Zuschlaggrößtkorn und Stahlfasergehalt; hinzu können weitere Einflußgrößen wie z. B. Art und Zusammensetzung des Zuschlags kommen) keine allein aussagekräftige Größe für Vergleich und Beurteilung der Verarbeitbarkeit, weil der Fasergehalt zusätzlich zu den übrigen genannten Einflußgrößen sowohl die Auflockerung beim losen Einfüllen des Frischbetons als auch seine Verdichtbarkeit auf dem Rütteltisch unterschiedlich beeinflusst. Daher können Stahlfaserbetone mit ausreichender Verarbeitbarkeit auch so große Verdichtungsmaße aufweisen, bei denen Betone ohne Stahlfasern für übliches Verdichten durch Rütteln schon praktisch nicht mehr verarbeitbar wären. Bei Stahlfaserbetonen, bei denen nur eine die Verarbeitbarkeit wesentlich beeinflussende Variante verändert wird, ist mit dem Verdichtungsmaß jedoch eine vergleichende Beurteilung der Verarbeitung möglich.

Aus allen diesen Gründen wurden zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Stahlfaserbetone außer dem Verdichtungsmaß auch der Verdichtungsaufwand (Rüttelzeit und Auflast) und der erreichte Verdichtungsgrad (Rohdichte und Luftgehalt des Frischbetons)

Platte A, Herstelloberseite



Platte B, Seitenfläche

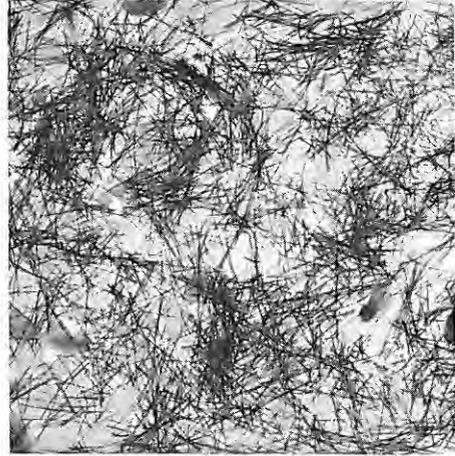
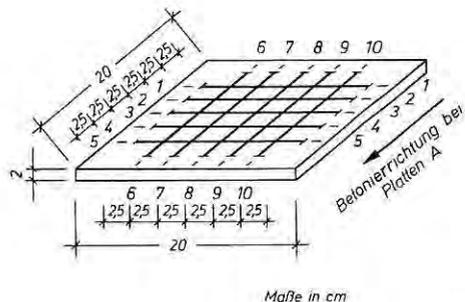


Bild 12 Orientierung der Stahlfasern in stehend hergestellten Balken 15/15/75 cm nach Tafel 5, Aufnahmen in Balkenmitte (Platten A und B in Anlehnung an Bild 2 aus Beton 2.10)

herangezogen (Tafeln 1 bis 3). Bei Stahlfaserbetonen mit Kiessand der Sieblinie B 8 wurde ein ausreichender Verdichtungsgrad bei Zementgehalten bis 330 kg/m^3 trotz sehr großen Verdichtungsaufwandes nicht und bei einem Zementgehalt von 360 kg/m^3 trotz großen Verdichtungsaufwandes nur knapp erreicht. Ein ausreichender Verdichtungsgrad ergab sich dafür mit mittlerem Verdichtungsaufwand erst bei einem Zementgehalt von 400 kg/m^3 .

Stahlfaserbeton mit Kiessand der Sieblinie B 16 erforderte für ausreichenden Verdichtungsgrad nur einen geringen Verdichtungsaufwand bei einem Zementgehalt von 330 kg/m^3 und Fasergehalten bis zu 1,5 Vol.-% sowie bei einem Zementgehalt von 360 kg/m^3 und Fasergehalten bis 2 Vol.-%, dafür aber einen noch vertretbaren mittleren Verdichtungsaufwand bei einem Zementgehalt von 330 kg/m^3 und 2 Vol.-% Fasern sowie bei einem Zementgehalt von 360 kg/m^3

Bild 13
Meßlinien zur Bestimmung der Fasersehnenlänge mit dem Meßlinienverfahren nach [13] an Platten 20/20/2 cm nach Bild 2; Betonierrichtung bei Platten B senkrecht zur Platte



Maße in cm

und 3 Vol.-% Fasern. Zur praktisch vollständigen Verdichtung von Stahlfaserbetonen mit Kiessand der Sieblinie B 32 dürfte bei Fasergehalten bis zu 2 Vol.-% und Zementgehalten von 330 und 360 kg/m³ (vermutlich auch bei einem Fasergehalt von 3 Vol.-% und einem Zementgehalt von 360 kg/m³) ein geringer Verdichtungsaufwand ausreichend sein. Bei Zuschlägen mit anderer Kornform oder anderer Kornzusammensetzung, insbesondere bei gebrochenen Zuschlägen, kann sich eine davon abweichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons ergeben. Nicht untersucht wurde, ob die Verarbeitbarkeit der Stahlfaserbetone durch Betonzusätze wesentlich zu beeinflussen ist.

5.1.2 *Einfluß der Faserzugabe auf die Faserverteilung im Beton*

Die Ergebnisse der Versuche über die Faserverteilung im Beton machen deutlich, daß die Stahlfasern bei beliebiger Zugabe im Beton sehr ungleichmäßig verteilt sein können und daß gleichmäßige Verteilung der Stahlfasern nur bei Anwendung bestimmter Betonherstellverfahren zu erwarten ist. Die bei diesen Versuchen verwendeten Betonherstellverfahren wurden aus den jeweils vorher gewonnenen Erkenntnissen entwickelt. Verfahren 1 nach Tafel 4, bei dem die Fasern in Teilmengen ohne vorherige Vereinzelung in die sich drehende Mischertrommel geschüttet wurden, erwies sich als ungeeignet, weil die Fasern im Beton sehr ungleichmäßig verteilt waren und der Beton zahlreiche Faserkonzentrationen (sog. Igel) aufwies. Die Gleichmäßigkeit der Faserverteilung war mit den Verfahren 2 und 3a nach Tafel 4, bei denen die Fasern in Teilmengen zwar vereinzelt und möglichst gleichmäßig bei allerdings ungleichmäßiger Verteilung des Betons in der Mischertrommel zugegeben wurden, bereits deutlich besser als bei Verfahren 1. Jedoch wurde beim Herstellverfahren 2 noch eine vorwiegend mittlere bis geringe und beim Verfahren 3a noch eine starke bis mittlere Igel-Bildung festgestellt. Die gleichmäßigste Faserverteilung lieferten die Betonherstellverfahren 3b und 4, bei dem entweder der Beton vor Zugabe jeder Faser-Teilmenge in der Mischertrommel gleichmäßig verteilt wurde (Verfahren 3b) oder bei dem die Fasern, ohne den Beton vorher in der Mischertrommel zu vergleichmäßigen, mit Hilfe eines längeren Trichters nur auf den Beton aufgestreut wurden (Verfahren 4), siehe Tafel 4 und Bild 1. Bei beiden Verfahren war die Faserverteilung stets gut. Faserkonzentrationen wurden im Stahlfaserbeton nach Verfahren 3b nur in geringem bis sehr geringem Maße und im Stahlfaserbeton nach Verfahren 4 überhaupt nicht mehr festgestellt.

Ein gesicherter Einfluß der Betonzusammensetzung auf die Faserverteilung und die Bildung von Faserkonzentrationen konnte aus den Versuchen nicht abgeleitet werden. Bei augenscheinlicher Beurteilung der Frischbetonbeschaffenheit wurde jedoch festgestellt, daß vorhandene Igel in zementleimreichem Beton mehr mit Zementleim durchzogen und fester waren. Dabei waren die Stahlfasern dieser Igel mehr mit Zementleim umhüllt, und der Stahlfaserbeton erschien optisch gleichmäßiger als bei zementleimärmerem Beton. Rohdichte, Luftgehalt und Verdichtungsmaß des Frischbetons ließen durchweg keinen Zusammenhang zur Faserverteilung im Beton erkennen. Einige Ergebnisse lassen jedoch vermuten, daß das Ver-

dichtungsmaß bei sehr starker Igelbildung u. U. dann etwas geringer ausfallen kann, wenn durch die Igelbildung der Fasergehalt des übrigen Betons deutlich verringert wird.

5.2 Festbetoneigenschaften

5.2.1 Faserverteilung und Faserorientierung

Alle Ergebnisse der Untersuchungen über die Faserverteilung im Festbeton ergaben, daß im Frischbeton festgestellte gleichmäßige Faserverteilung ohne Faserkonzentrationen und ungleichmäßige Faserverteilung mit Faserkonzentrationen (Igel) auch im Festbeton festgestellt und somit durch den Einbau des Betons nicht verändert wurden. Von den dafür als Beispiel wiedergegebenen Bildern 7 bis 10 weist nur der Beton 1.4.2 in Bild 7 ungleichmäßige Faserverteilung mit Faserkonzentrationen auf. In den Bildern 8 bis 10 sind die Fasern praktisch gleichmäßig verteilt. Die dort mit deutlich geringem Fasergehalt erkennbaren Stellen sind durch das Vorhandensein von Zuschlagkörnern bedingt und z. B. für Beton mit gleichem Fasergehalt von 2 Vol.-% bei einem Zuschlaggrößtkorn von 8 mm (Bild 10) deutlich kleiner als bei einem Zuschlaggrößtkorn von 16 mm (Bild 8) und von 32 mm (Bild 9), wenn auch der Zementgehalt beim Beton in Bild 10 360 kg/m^3 und in den Bildern 8 und 9 330 kg/m^3 betrug.

Die augenscheinlichen Feststellungen über die Faserorientierung am Festbeton sowohl an Bruch- und Schnittflächen als auch an den Röntgenaufnahmen bestätigen übereinstimmend, daß Stahlfasern in den untersuchten unterschiedlichen Prüfkörpern aus Stahlfaserbeton mit gleichmäßiger Faserverteilung vorwiegend senkrecht zur Betonierrichtung der Prüfkörper orientiert sind, innerhalb dieser zur Herstellungsseite der Prüfkörper parallelen Ebenen aber allseits gerichtet sein können, siehe z. B. Bilder 4 und 5 sowie 6 bis 12. Die für die Platten 20/20/2 cm einiger Betone der Serie 2 in Bild 6 gewählte vereinfachte schematische Darstellung der augenscheinlichen Ergebnisse der Röntgenuntersuchungen gibt nur die überwiegend erkennbaren Orientierungsrichtungen, allerdings getrennt für die Platten A (Platte in Betonierrichtung) und B (Platte senkrecht zur Betonierrichtung), gemäß Bild 2 wieder. Auf Bild 6 ist deutlich zu erkennen, daß die Stahlfasern in den Platten B (Platte senkrecht zur Betonierrichtung) stets allseitig orientiert waren und daß sie bei der Mehrzahl der untersuchten Platten A (Platte in Betonierrichtung) vorwiegend senkrecht zur Betonierrichtung, d. h. vorwiegend in Ebenen parallel zur Herstellungsseite der Prüfkörper, verliefen. Dieser Unterschied zwischen den Platten A und B ist auch aus den Bildern 8 bis 10 zu erkennen. Ausnahmen, bei denen die Faserorientierung nur im unteren Prüfkörperteil der Platten A festgestellt wurde, ergaben sich für die Betone 2.2, 2.7 und 2.15 (siehe Bild 6), d. h. bei Betonen mit einem geringen Fasergehalt von 1,0 und 1,5 Vol.-% und gleichzeitig einem für diese Stahlfaserbetonarten geringeren Zementgehalt (360 kg/m^3 bei 8 mm und 330 kg/m^3 bei 16 und 32 mm Zuschlaggrößtkorn). Die nachträgliche Untersuchung des Betons 2.6 (Zementgehalt 330 kg/m^3 , Zuschlaggrößtkorn 16 mm, Fasergehalt 1 Vol.-%) ergab für die Platte A dieses Betons die gleiche Faserorientierung wie für die Platten A der Betone 2.2, 2.7 und 2.15. Ob

dieser Zusammenhang als wesentlicher Grund für diese Ausnahmen von der sonst über den ganzen Querschnitt festgestellten Faserorientierung angesehen werden kann, muß durch weitere Versuche geklärt werden. Möglicherweise können hier auch Randeinflüsse bei Herstellung der Prüfkörper auf die festgestellte Faserorientierung nicht ausgeschlossen werden. – Ähnlich wie bei den Würfeln war der überwiegende Anteil der Stahlfasern auch bei den liegend und stehend hergestellten Balken nur in den Ebenen parallel zur Herstellungsseite beim Betonieren allseits orientiert (siehe z. B. als unmittelbaren Vergleich die Platten A und B des Betons 2.10 in Bild 12) und verlief nur ein geringer Faseranteil schräg oder senkrecht zu diesen Ebenen.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse kann der Grad der Faserorientierung, d. h. der Anteil der Gesamtfasermenge, der in der Ebene senkrecht zur Betonierichtung liegt, unterschiedlich groß sein. Er war für sonst gleiche Betone bei Zementgehalten von 360 kg/m^3 (z. B. Betone 2.12 und 2.19) geringer als bei Zementgehalten von 330 kg/m^3 (z. B. Betone 2.8 und 2.16, siehe z. B. Bilder 8 und 9), bei einem Größtkorn von 8 mm geringer als bei einem Größtkorn von 16 und 32 mm, bei größerem Mörtelanteil des Betons geringer als bei kleinerem Mörtelanteil, bei kleinen Fasergehalten von 1,0 und 1,5 Vol.-% geringer als bei Fasergehalten von 2 und 3 Vol.-% und in den Platten A aus liegend hergestellten Balken (Bild 11) geringer als in den Platten A aus stehend hergestellten Balken (Bild 12).

Mit diesen augenscheinlichen Beurteilungen auch der Röntgenaufnahme ist zwar eine quantitative Aussage über die Faserorientierung im Stahlfaserbeton nicht möglich. Aus den Ergebnissen kann aber gefolgert werden, daß Stahlfasern in Prüfkörpern aus Stahlfaserbeton überwiegend in den Ebenen senkrecht zur Betonierichtung orientiert sind und daß der Grad der Faserorientierung überwiegend von Zementgehalt, Mörtelanteil, Zuschlaggrößtkorn, Stahlfasergehalt, Verarbeitbarkeit und dem Weg des Betons beim Verdichten, insbesondere den Bewegungen des Grobzuschlags, abhängig ist.

5.2.2 Einfluß der Faserverteilung auf die Festbetoneigenschaften

Bei den lediglich orientierenden Versuchen über das Festigkeits- und das Verformungsverhalten von Betonen mit gleichmäßiger und ungleichmäßiger Faserverteilung der Serie 1 (siehe Tafel 2) lagen die 28-Tage-Druckfestigkeiten der mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit geprüften Zylinder 15/30 cm insgesamt zwischen 47 und 52 N/mm^2 . Dabei war ein systematischer Unterschied zwischen den Betonen mit gleichmäßiger und mit ungleichmäßiger Verteilung der Fasern nicht festzustellen. Dagegen waren die Längsstauchungen und die Energieaufnahme beim Beton mit gleichmäßiger Faserverteilung – abgesehen von einer Ausnahme bei der Längsstauchung – immer und zum Teil deutlich größer als beim Beton mit ungleichmäßiger Faserverteilung. Die Abnahme der Energieaufnahme durch ungleichmäßige Faserverteilung betrug bei geringer bis mittlerer Igelbildung 4 und 5 % und bei starker Igelbildung 26 und 36 %. Die gleichmäßige Verteilung der Fasern im Beton ohne Igel ist somit

– ungeachtet des Einflusses der Faserorientierung – eine wichtige Voraussetzung dafür, daß die Fasern eine wesentliche Verbesserung der Festbetoneigenschaften bewirken können.

5.2.3 Einfluß der Faserorientierung auf die Festigkeit

5.2.3.1 Druckfestigkeit

Wie aus Tafel 6 hervorgeht, lagen die an gesondert hergestellten 20-cm-Würfeln (Tafel 5, Nr. 5) für die Stahlfaserbetone der Serie 2 (Tafel 3) im Alter von 28 Tagen ermittelten Druckfestigkeiten bei Belastung in Betonierichtung zwischen 53 und 65, i. M. bei 60 N/mm² (Standardabweichung zwischen 1,1 und 3,7, i. M. bei 2,0 N/mm²), und bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung zwischen 53 und 60, i. M. bei 58 N/mm² (Standardabweichung zwischen 0,8 und 2,4, i. M. bei 1,5 N/mm²). Die entsprechende Druckfestigkeit der dazugehörigen Nullbetone (Beton ohne Fasern) betrug bei Belastung in Betonierichtung 52 bis 55, i. M. 53 N/mm² (Standardabweichung 1,1 bis 3,3, i. M. 1,8 N/mm²), und bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung 52 bis 54, i. M. 53 N/mm² (Standardabweichung 0,8 bis 1,6, i. M. 1,3 N/mm²).

Während die mittlere Druckfestigkeit der 20-cm-Würfel des sowohl in Betonierichtung als auch senkrecht zur Betonierichtung belasteten Nullbetons gleich war, war die Druckfestigkeit der Stahlfaserbetone – abgesehen von einer Ausnahme – bei Belastung in Betonierichtung stets größer als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung. Die Druckfestigkeit der Stahlfaserbetone war bei Belastung in Betonierichtung, bei der die Faserorientierung in allen Querdehnungsrichtungen dehnungsbehindernd wirken kann, für Betone mit 1 Vol.-% Fasern i. M. um 4 %, für Betone mit 2 Vol.-% Fasern i. M. um 6 % und für alle geprüften Stahlfaserbetone der Serie 2 im Mittel um 4 % größer als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung, bei der die Faserorientierung nur in der Hälfte der möglichen Querdehnungsrichtungen dehnungsbehindernd wirken kann. Die Druckfestigkeit der beiden unterschiedlich belasteten Stahlfaserbetone war jedoch deutlich größer als die des Nullbetons. Die Vergrößerung der Druckfestigkeit gegenüber dem Nullbeton betrug bei Belastung in Betonierichtung i. M. 8 % für die Betone mit 1 Vol.-% Fasern, i. M. 18 % für die Betone mit 2 Vol.-% Fasern und i. M. 13 % für alle Stahlfaserbetone der Tafel 6, aber bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung nur i. M. 5 % für Betone mit 1 Vol.-% Fasern, i. M. 12 % für Betone mit 2 Vol.-% Fasern und i. M. 9 % für alle Stahlfaserbetone der Serie 2, siehe auch Bild 14.

Da nicht auszuschließen war, daß diese Zusammenhänge für die Druckfestigkeit auch von der Prüfkörpergröße und von der Art und Größe der beim Betonieren hergestellten Probekörper abhängig ist, wurde der Einfluß der Faserorientierung auf die Druckfestigkeit auch an Bohrkernen 10/20 cm (Tafel 5, Nr. 11), die in und senkrecht zur Betonierichtung aus Balken 20/20/90 cm (Tafel 5, Nr. 10) herausgebohrt wurden, und für einige Betone der Serie 2 an 15-cm-Würfeln (Tafel 5, Nr. 8) ermittelt, die aus liegend hergestellten Balken 15/15/70 cm und aus stehend hergestellten Balken 15/15/75 cm herausgesägt wurden (Tafel 5, Nr. 7). Gemäß Tafel 6 la-

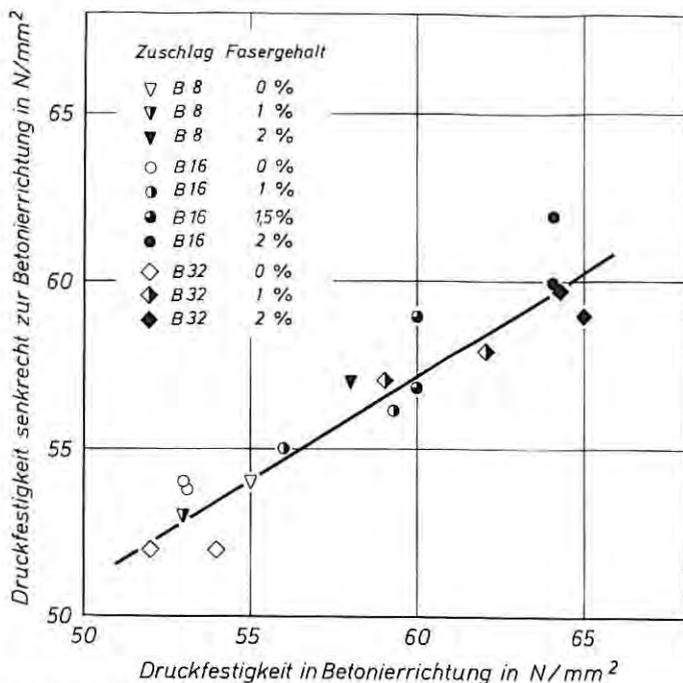


Bild 14 28-Tage-Druckfestigkeit von 20-cm-Würfeln aus den Betonen der Serie 2 bei Belastung in und senkrecht zur Betonierrichtung

gen die an den Bohrkernen 10/20 cm für die Stahlfaserbetone der Serie 2 ermittelten Druckfestigkeiten bei Belastung in Betonierrichtung zwischen 38 und 49, i. M. bei 42 N/mm² (Standardabweichung zwischen 0,0 und 4,0, i. M. bei 1,7 N/mm²), und bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung zwischen 37 und 42, i. M. bei 39 N/mm² (Standardabweichung zwischen 0,0 und 2,9, i. M. bei 1,3 N/mm²). Die zugehörigen Nullbetone wiesen Druckfestigkeiten bei Belastung in Betonierrichtung zwischen 36 und 38, i. M. von 37 N/mm² (Standardabweichung zwischen 1,0 und 2,1, i. M. von 1,4 N/mm²), und bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung zwischen 38 und 42, i. M. von 39 N/mm² (Standardabweichung zwischen 0,6 und 1,7, i. M. von 1,1 N/mm²) auf.

Wie die Ergebnisse zeigen, war die durch Belastung in Betonierrichtung bedingte Druckfestigkeit der Bohrkern 10/20 cm gegenüber der Druckfestigkeit bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung mit i. M. 15 % für Betone mit 2 Vol.-% Fasern und mit i. M. 8 % für alle Stahlfaserbetone der Serie 2 noch deutlich größer als bei den 20-cm-Würfeln. Die Prüfung der Bohrkern 10/20 cm mit Belastung in Betonierrichtung ergab allerdings – im Gegensatz zur Prüfung der 20-cm-Würfel – für die Betone mit 1 Vol.-% Fasern keine höhere Druckfestigkeit und für die Nullbetone eine i. M. 5 % geringere Druckfestigkeit als die Prüfung bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung. Bemerkenswert ist aber auch, daß die Druckfestigkeitssteigerung der Bohrkern 10/20 cm aus Stahlfaserbeton ge-

genüber dem zugehörigen Nullbeton bei Belastung in Betonierichtung mit i. M. 7 % für Betone mit 1 Vol.-% Fasern, mit i. M. 20 % für Betone mit 2 Vol.-% Fasern und mit i. M. 14 % für alle Stahlfaserbetone nach Tafel 6 meist noch geringfügig größer war als bei 20-cm-Würfeln, daß aber eine solche Druckfestigkeitssteigerung gegenüber dem Nullbeton bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung sowohl für Betone mit 2 Vol.-% Fasern als auch für alle Stahlfaserbetone im Mittel nicht vorhanden und damit deutlich kleiner als bei den 20-cm-Würfeln war, siehe auch Bild 15. Es ist noch zu ergänzen, daß die Standardabweichung der Druckfestigkeit bei Belastung in Betonierichtung um i. M. 27 bis 38 % größer war als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung, bei Prüfung der Bohrkern 10/20 cm um i. M. 13 bis 22 % geringer war als bei Prüfung der 20-cm-Würfel und bei Prüfung der Stahlfaserbetone um i. M. 11 bis 21 % größer war als bei den Nullbetonen.

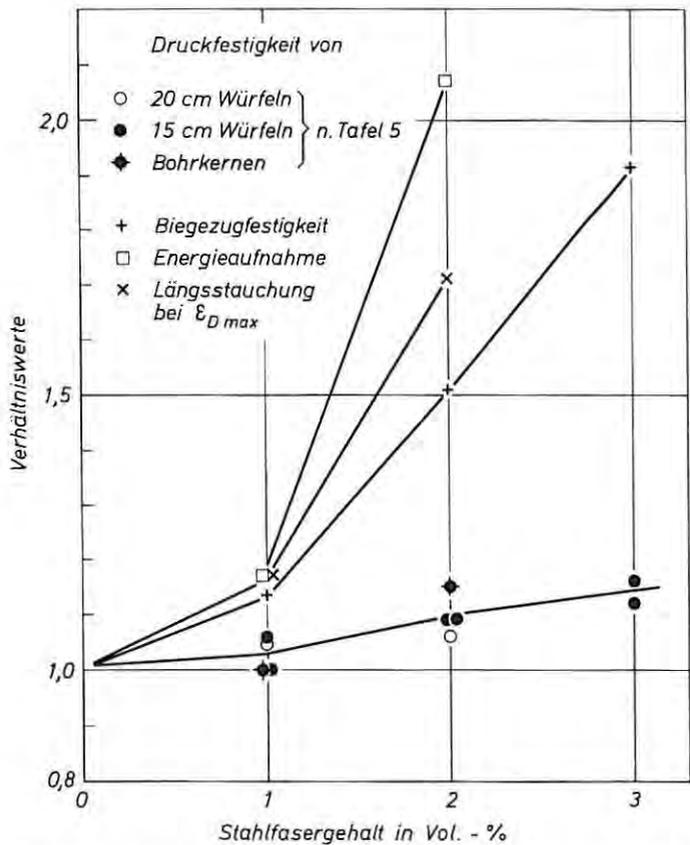


Bild 15 Ergebnisse der Festigkeits- und Verformungsprüfungen bei Belastung in Betonierichtung, bezogen auf die Ergebnisse bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung, in Abhängigkeit vom Fasergehalt

Die lediglich orientierenden wenigen Untersuchungen über die Druckfestigkeit von 15-cm-Würfeln (Tafel 5, Nr. 8), die sowohl aus stehend als auch aus liegend hergestellten Balken mit 15 x 15 cm Querschnitt (Tafel 5, Nr. 7) herausgesägt und jeweils in Längs- und Querrichtung der Balken belastet worden sind, bestätigen im wesentlichen die Ergebnisse der 20 cm-Würfel. Auch hier (siehe Tafel 7) wiesen die Stahlfaserbetone bei Belastung in Betonierrichtung i. M. eine um 6 % höhere Druckfestigkeit als bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung sowie bei den stehend hergestellten Balken i. M. eine um 26 % und bei den liegend hergestellten Balken i. M. eine um 12 % größere Druckfestigkeit als die dazugehörigen Nullbetone (Beton ohne Fasern) auf, siehe auch Bild 15. Daß die Druckfestigkeitssteigerung gegenüber dem Nullbeton bei diesen Versuchen größer als bei den übrigen Versuchen ausgefallen ist, kann u. a. darauf zurückzuführen sein, daß hier anstelle von zwei Betonen mit 1,5 Vol.-% Fasern ein Beton mit 3 Vol.-% Fasern einbezogen wurde. Bemerkenswert ist außerdem, daß die in Längsrichtung der liegend hergestellten Balken belasteten 15-cm-Würfel aus Stahlfaserbeton im Gegensatz zum Beton ohne Fasern eine i. M. um 8 % geringere Druckfestigkeit aufwiesen als die in Querrichtung der liegend hergestellten Balken belasteten 15-cm-Würfel. Die Frage, ob dieser Festigkeitsunterschied gesichert oder als Ausreißer zu werten ist, kann nur durch weitere Versuche geklärt werden. Die Ergebnisse wurden daher in die Gesamtauswertung nicht miteinbezogen.

Zusammenfassend ist aus diesen Versuchen festzustellen, daß sich die Faserorientierung in Ebenen senkrecht zur Betonierrichtung auf die Druckfestigkeit von Stahlfaserbetonen auswirkt. Je nach Art und Größe der Prüfkörper und der beim Betonieren hergestellten Probekörper kann die Druckfestigkeit von Stahlfaserbeton bei Belastung in Betonierrichtung i. M. um 5 bis 15 % größer als bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung sein. Diese Druckfestigkeitssteigerung kann durch die aufgrund der Faserorientierung bedingte allseitige Querdehnungsbehinderung beim Druckversuch bewirkt worden sein. Die teilweise bei Belastung senkrecht zur Betonierrichtung gegenüber dem Nullbeton noch ermittelte geringere Druckfestigkeitssteigerung dürfte darauf zurückzuführen sein, daß dabei Stahlfasern noch in der Hälfte der Querdehnungsrichtungen orientiert sein können.

5.2.3.2 *Biegezug- und Spaltzugfestigkeit*

Wie aus den allerdings nur wenigen Biegezugversuchen der Tafel 7 hervorgeht, kann sich die Faserorientierung auf die Biegezugfestigkeit des Stahlfaserbetons noch deutlich mehr auswirken als auf seine Druckfestigkeit, während die 28-Tage-Biegezugfestigkeit des Nullbetons (Beton ohne Fasern) sowohl für die liegend hergestellten Balken 15/15/70 cm (Tafel 5, Nr. 7) als auch für die stehend hergestellten Balken 15/15/75 cm (Tafel 5, Nr. 7) gleich war und i. M. 6,2 N/mm² betrug. Die Biegezugfestigkeit der Stahlfaserbetone lag bei den liegend hergestellten Balken zwischen 7,0 und 11,1, i. M. bei 8,3 N/mm², und bei den stehend hergestellten Balken zwischen 4,8 und 6,2, i. M. bei 5,6 N/mm². Damit wiesen die liegend hergestellten Stahlfaserbetonbalken bei 1 Vol.-% Fasern i. M. eine um 13 %, bei 2

Vol.-% Fasern i. M. eine um 45 % und bei 3 Vol.-% Fasern i. M. eine um 91 % größere Biegezugfestigkeit auf als die stehend hergestellten Balken. Gegenüber dem Nullbeton hatten die liegend hergestellten Balken aus Stahlfaserbeton je nach Fasergehalt eine um 13 bis 79, i. M. um 40 %, größere Biegezugfestigkeit, die stehend hergestellten Balken aus Stahlfaserbeton aber eine um 0 bis 15, i. M. um 7 %, kleinere Biegezugfestigkeit. Siehe auch Bilder 15 und 16.

Als wesentlichste Ursache für diese Steigerung der Biegezugfestigkeit bei den in Betonierrichtung belasteten Balken aus Stahlfaserbeton kommt nur die Faserorientierung in Betracht, weil die liegend und die stehend hergestellten Balken der Nullbetone gleiche Festigkeiten hatten, weil die stehend hergestellten Balken aus Stahlfaserbeton keine Festigkeitssteigerung gegenüber dem Nullbeton aufwiesen und weil die Beschaffenheit der stehend hergestellten Stahlfaserbetonbalken – abgesehen von der Faserorientierung und der teilweise etwas geringeren Biegezugfestigkeit gegenüber dem Nullbeton – bei Prüfung keine systematischen Nachteile, sondern eher gewisse Vorteile, wie z. B. gleichmäßigere Querschnittsbearbeitung, erkennen ließen. Die durch die Faserorientierung bedingte Festigkeitssteigerung dürfte bei der Biegezugfestigkeit deshalb deutlich größer als bei der Druckfestigkeit sein, weil Stahlfasern nur bei der Biegeprüfung liegend hergestellter Balken grund-

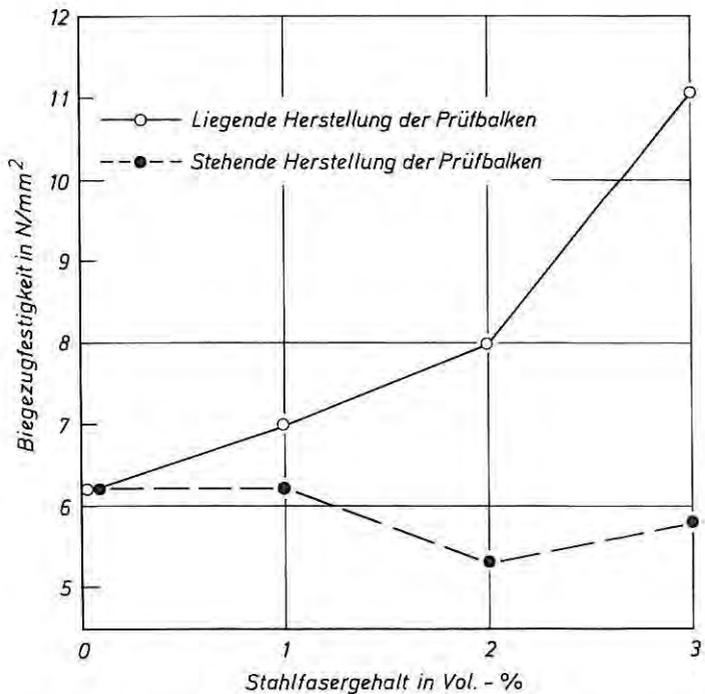


Bild 16 28-Tage-Biegezugfestigkeit liegend und stehend hergestellter Balken nach Tafel 5 aus den Betonen 2.9 bis 2.13 in Abhängigkeit vom Fasergehalt

sätzlich in Richtung der Zugbeanspruchung orientiert sind und weil Stahlfasern bei der Druckprüfung mit Belastung in Betonierichtung in allen Querdehnungsrichtungen, mit Belastung senkrecht zur Betonierichtung aber immer noch in der Hälfte der Querdehnungsrichtungen dehnungsbehindernd wirken können.

Es ist noch zu ergänzen, daß – wie zu erwarten – auch die Spaltzugfestigkeit des Betons durch Fasern verbessert wird, wenn Faserorientierungsrichtungen in Richtung der Zugbeanspruchungen verlaufen. Bei den Spaltzugversuchen, deren Ergebnisse in Tafel 6 wiedergegeben sind, war dies der Fall, da dabei die 20-cm-Würfel (Tafel 5, Nr. 5) und beim Beton 2.4 ein Bohrkern 10/20 cm (nach Tafel 5, Nr. 11) in Betonierichtung (siehe auch Bild 2) geprüft wurden und die Stahlfasern vorwiegend in den Ebenen senkrecht zur Betonierichtung allseits orientiert waren. Die Spaltzugfestigkeit lag je nach Betonzusammensetzung beim Nullbeton zwischen 3,1 und 3,5, i. M. bei 3,3 N/mm², und beim Stahlfaserbeton zwischen 3,4 und 5,5, i. M. bei 4,1 N/mm². Je nach Betonzusammensetzung und insbesondere Fasergehalt wies der Stahlfaserbeton eine um 6 bis 67 % größere Spaltzugfestigkeit als der Nullbeton auf. Im Mittel betrug die Steigerung der Spaltzugfestigkeit gegenüber dem Nullbeton beim Beton mit 1 Vol.-% Stahlfasern 8 % und beim Beton mit 2 Vol.-% Stahlfasern 31 %.

5.2.4 Einfluß der Faserorientierung auf das Verformungsverhalten und das Arbeitsvermögen

5.2.4.1 Längsstauchung und Querdehnung

Die für alle geprüften Betone der Serie 2 an gesondert hergestellten Betonzylindern 15/30 cm (Tafel 5, Nr. 4, siehe Tafel 8) sowie an Bohrkernen 10/20 cm aus liegend hergestellten Balken (Tafel 5, Nr. 11, siehe Tafeln 9 A und 9 B und z. B. Bild 17) ermittelten Längsstauchungen im Kurzzeit-Druckversuch waren bei einer Belastung von 30 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 0,26 und 0,47 mm/m, i. M. von 0,37 mm/m, und von 50 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 0,44 und 0,85, i. M. von 0,66 mm/m, noch klein, jedoch nur bei den in Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen im allgemeinen bereits systematisch größer als bei den Nullbetonen ohne Fasern. Dies ist möglicherweise weniger auf den Einfluß der Stahlfasern als auf die im allgemeinen bei den in Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen größere Druckfestigkeit und die damit bei gleichen Belastungsgraden höheren absoluten Druckspannungen zurückzuführen. Bei Belastungen oberhalb von 50 % der Druckfestigkeit nahmen die Längsstauchungen erwartungsgemäß weiter zu, wobei die Zunahme bis rd. 80 % der Druckfestigkeit bei allen senkrecht zur Betonierichtung belasteten und bei den in Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen mit 1 Vol.-% Fasern praktisch nicht und bei den in Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen mit 2 Vol.-% Fasern i. M. nur um rd. 15 % größer war als bei den Nullbetonen. Erst bei weiterer Belastung bis zum Erreichen der Druckfestigkeit nahmen die Längsstauchungen fast aller geprüften Stahlfaserbetone nennenswert stärker zu als die der Nullbetone. Dabei war die Zunahme bei allen in Betonierichtung und den meisten der senkrecht zur Betonierichtung belasteten Stahlfaser-

betone (Ausnahme Betone 2.3 und 2.16, siehe Tafel 9 B) mit wachsendem Stahlfasergehalt größer sowie bei den in Betonierichtung belasteten Bohrkernen aus Stahlfaserbetonen deutlich größer und bei den ebenfalls in Betonierichtung geprüften Zylindern 15/30 cm etwas größer als bei den senkrecht zur Betonierichtung belasteten Bohrkernen. Dementsprechend waren die Längsstauchungen der Stahlfaserbetone bei Erreichen der Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Fasergehalt bei den in Betonierichtung belasteten Bohrkernen 10/20 cm mit i. M. 2,44 mm/m (1 Vol.-% Fasern) und i. M. 3,93 mm/m (2 Vol.-% Fasern) um 9 bis 39 % größer als bei den in gleicher Richtung belasteten Zylindern 15/30 cm und um 9 bis 72 % größer als bei den senkrecht zur Betonierichtung belasteten Betonen. Die Längsstauchungen der Stahlfaserbetone waren damit in Abhängigkeit vom Stahlfasergehalt bei den in Betonierichtung belasteten Bohrkernen um 23 bis 148 %, bei den Zylindern 15/30 cm um 19 bis 87 % und bei den senkrecht zur Betonierichtung belasteten Bohrkernen mit Ausnahme des Betons 2.3 (Tafel 3) um 23 bis 44 % größer als die Längsstauchungen der Nullbetone von i. M. 1,67 mm/m, wobei die mit 2,40 mm/m sehr große Längsstauchung des senkrecht zur Betonierichtung belasteten Nullbetons 2.1 (Tafel 3) als Ausreißer behandelt und nicht mitberücksichtigt wurde.

Die bei Erreichen der Druckfestigkeit mit Wegaufnehmern gemessenen Gesamtlängsstauchungen waren prüftechnisch bedingt i. M. über alle geprüften Betone rd. 30 % größer als die mit den mittig aufgeklebten DMS gemessenen Werte. Wurden die Prüfkörper nach Überschreiten der Druckfestigkeit weiter belastet, so nahm die dann mit Wegaufnehmern ermittelte Längsstauchung aller untersuchten Betone weiter zu, siehe auch Bild 17. Die Zunahme war bei den Stahlfaserbetonen immer größer als bei den Nullbetonen, bei den

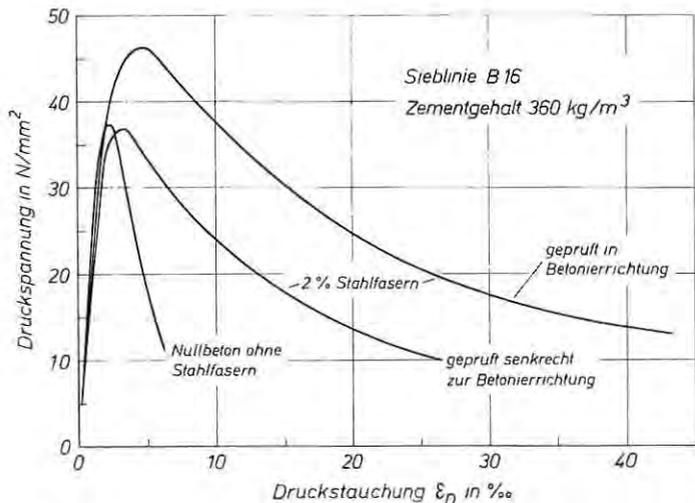


Bild 17 Druckspannungs-Stauchungs-Kurven des Betons 2.9 ohne Stahlfasern und des Betons 2.12 mit 2 Vol.-% Stahlfasern im Kurzzeit-Druckversuch, geprüft an Bohrkernen 10/20 cm nach Bild 3

Betonen mit 2 Vol.-% Stahlfasern – abgesehen von einer Ausnahme – größer als bei den Betonem mit 1 Vol.-% Stahlfasern und bei den in Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen größer als bei den vergleichbaren senkrecht zur Betonierichtung belasteten Stahlfaserbetonen. Bei Wiederabfall der Belastung auf 30 % der Druckfestigkeit wurden bei Belastung in Betonierichtung an den Zylindern 15/30 cm Längsstauchungen i. M. zwischen 12,80 (bei 1 Vol.-% Fasern) und 27,40 mm/m (bei 2 Vol.-% Fasern) sowie an Bohrkernen 10/20 cm i. M. zwischen 18,20 (bei 1 Vol.-% Fasern) und 34,50 mm/m (bei 2 Vol.-% Fasern) und bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung an Bohrkernen 10/20 cm i. M. zwischen 15,30 (bei 1 Vol.-% Fasern) und 19,70 mm/m (bei 2 Vol.-% Fasern) gemessen. Die an den Zylindern 15/30 cm ermittelten Längsstauchungen der Stahlfaserbetone mit 1 Vol.-% Fasern waren damit überraschenderweise um rd. 17 % kleiner, bei den übrigen Stahlfaserbetonen mit Ausnahme des Betons 2.15 (Bohrkerne 10/20 cm) aber in Abhängigkeit von der Prüfkörperart und dem Fasergehalt um rd. 20 bis 75 % größer als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung. Die Längsstauchungen bei 30 % Restlast waren damit bei den Faserbetonen in Abhängigkeit vom Fasergehalt und von der Prüfkörperart bei Belastung in Betonierichtung um i. M. 170 bis 450 %, bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung dagegen nur um i. M. 130 bis rd. 200 % größer als die Längsstauchungen der Nullbetone bei gleichem Belastungsgrad. Die an den in und senkrecht zur Betonierichtung belasteten Bohrkernen der Stahlfaserbetone 2.8 und 2.16 (Tafel 3) mit 330 kg/m³ Zement ermittelten Längsstauchungen waren jeweils um rd. 40 % kleiner als bei den sonst vergleichbaren Betonem 2.12 und 2.19 mit allerdings größerem Zementgehalt von 360 kg/m³. Bei den Betonem 2.3 und 2.4 mit Zuschlag B 8 und 360 bzw. 400 kg/m³ Zement sowie bei den Zylindern 15/30 cm der gleichen Betone war dies tendenziell ebenfalls festzustellen, allerdings weniger ausgeprägt. Die bei 30 % „Restlast“ unterschiedlichen Längsstauchungen der Stahlfaserbetone vorwiegend mit 2 Vol.-% Fasern lassen vermuten, daß diese Längsstauchung unter sonst gleichen Bedingungen bei höherem Zementgehalt wegen des größeren Leimanteils und möglicherweise wegen der etwas schwächeren Faserorientierung größer ist als bei geringerem Zementgehalt und bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung möglicherweise wegen der Orientierung von Fasern auch in der Belastungsrichtung trotz der geringeren Querdehnungsbehinderung geringer ist als bei Belastung in Betonierichtung. Bei den gesondert hergestellten Zylindern 15/30 cm war dieses Verhalten möglicherweise wegen der im Bereich der Zylindermantelfläche veränderten Faserorientierung nicht so deutlich ausgeprägt. Im allgemeinen weist eine größere Längsstauchung bei der Restlast von 30 % der Druckfestigkeit unter sonst gleichen Bedingungen, d. h. auch bei gleichem Zementleimanteil, darauf hin, daß diese Prüfkörper noch länger einen größeren Lastanteil aufnehmen können als Prüfkörper mit geringer Längsstauchung (siehe Abschnitt 5.2.1 und Bild 6). Für eine weitergehende Klärung sind dazu jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Die Querdehnungen aller untersuchten Betone (Tafeln 8, 9A und 9B) waren bei einer Belastung von 30 % der Druckfestigkeit mit Werten zwischen 0,03 und 0,14 mm/m und von 50 % der Druckfestigkeit

mit Werten zwischen 0,09 und 0,27 mm/m noch sehr klein. Dabei war jedoch im allgemeinen ein geringfügiger Trend zu erkennen, daß die Querdehnung mit wachsendem Fasergehalt größer wird. Dieser Trend wurde bei größerer Belastung deutlicher. Die in Betonierichtung belasteten Betonzylinder 15/30 cm aus Stahlfaserbeton mit 2 Vol.-% Fasern wiesen bei 80 % der Druckfestigkeit i. M. eine um 53 % größere Querdehnung als der Nullbeton und eine um 27 % größere Querdehnung als der Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern und bei 98 % der Druckfestigkeit i. M. eine um 176 % größere Querdehnung als der Nullbeton und eine um 77 % größere Querdehnung als der Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern auf (siehe auch Tafel 8).

Die lediglich orientierenden Querdehnungsbestimmungen an Bohrkernen 10/20 cm (siehe Tafeln 9A und 9B) bestätigen diesen Trend, lassen aber erkennen, daß er bei Belastung in Betonierichtung wesentlich deutlicher ausgeprägt ist als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung.

Zusammenfassend ist aus den Messungen der Längsstauchung und Querdehnung festzustellen, daß sich die Faserorientierung senkrecht zur Betonierichtung auf die Längsstauchung und die Querdehnung von Stahlfaserbetonen auswirkt. Je nach Art und Größe der Prüfkörper und der beim Betonieren hergestellten Probekörper, dem Fasergehalt und der Betonzusammensetzung kann die Längsstauchung von Stahlfaserbetonen bei gleichen Belastungsgraden bei Beanspruchung in Betonierichtung um i. M. 7 bis 75 % größer sein als bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung. Die Belastungsgrade beziehen sich dabei allerdings auf teilweise unterschiedliche, bei größeren Fasergehalten in der Regel in Betonierichtung größere Druckfestigkeiten. Die bei den Stahlfaserbetonen überwiegend auch bei Belastung senkrecht zur Betonierichtung ermittelte, allerdings kleinere Vergrößerung der Längsstauchungen gegenüber den Nullbetonen dürfte, wie bei den Untersuchungen der Druckfestigkeit, wiederum darauf zurückzuführen sein, daß dabei Stahlfasern noch in der Hälfte der Querdehnungsrichtungen orientiert sein können und daß diese Fasern besonders bei sehr großen Längsstauchungen die Querdehnung wirksam behindern können. Die bei gleichen Belastungsgraden von 98 und 100 % der Druckfestigkeit mit einer Ausnahme im Vergleich zu den in gleicher Richtung belasteten Bohrkernen 10/20 cm kleineren Längsstauchungen der Zylinder 15/30 cm aus Stahlfaserbeton sind möglicherweise auf die bei den gesondert hergestellten Zylindern – wie in den Platten A der Würfel (siehe Bilder 2, 8 und 9) – parallel zu den Zylinderwandungen orientierten Fasern zurückzuführen, die zusätzlich verformungsbehindernd und festigkeitssteigernd wirken können und die von den mittig aus Balken herausgesägten Bohrkernen nicht erfaßt werden.

5.2.4.2 *Volumenverminderung und Arbeitsvermögen*

Als weitere Kenngröße für den Einfluß der Faserorientierung auf die Verformungskennwerte wurde aus den Längsstauchungen und Querdehnungen (siehe Abschn. 5.2.4.1 und Tafeln 8, 9A und 9B) die größte Volumenverminderung errechnet. Sie lag bei den in Beto-

nierrichtung belasteten Betonzylindern 15/30 cm (siehe Tafel 8) insgesamt zwischen 0,52 und 0,80 ‰. Sie war jedoch beim Stahlfaserbeton – abgesehen von den Betonen mit 8 mm Größtkorn – etwas größer als beim Nullbeton und nahm in der Regel mit zunehmendem Fasergehalt zu. Im Mittel wies der Stahlfaserbeton mit 2 Vol.-% Fasern eine 16 % größere maximale Volumenverringerung als der Nullbeton und eine um 13 % größere maximale Volumenverminderung als der Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern auf. Die maximale Volumenverminderung trat im allgemeinen mit zunehmendem Fasergehalt bei einem etwas geringeren, auf die Druckfestigkeit bezogenen Belastungsanteil auf, und zwar für den Nullbeton i. M. bei 88 %, für den Stahlfaserbeton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. bei 85 % und für den Stahlfaserbeton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. bei 82 % der Druckfestigkeit. – Die lediglich orientierend untersuchten Bohrkern 10/20 cm (siehe Tafel 9A) zeigten bei Belastung in Betonierichtung den gleichen Trend wie die in Betonierichtung belasteten Betonzylinder 15/30 cm. Bei ihnen war die maximale Volumenverminderung i. M. um 12 % (Beton mit 1 Vol.-% Fasern) und 20 % (Beton mit 2 Vol.-% Fasern) größer als bei den Zylindern 15/30 cm und für den Beton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. um 19 % größer als für den Beton mit 1 Vol.-% Fasern. Sie trat für Beton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. bei 86 % und für den Beton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. bei 81 % der Druckfestigkeit auf. – Die lediglich orientierend untersuchten Bohrkern 10/20 cm (siehe Tafel 9B) mit Belastung senkrecht zur Betonierichtung weisen diesen Trend nicht auf. Für sie war die maximale Volumenverminderung beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern mit i. M. 0,44 ‰ überwiegend deutlich kleiner als beim Beton mit 1 Vol.-% Fasern und deutlich kleiner als bei den in Betonierichtung belasteten Bohrkernen aus Beton mit 2 Vol.-% Fasern. Die maximale Volumenverminderung trat für den Beton mit 1 Vol.-% Fasern mit i. M. bei 87 % wieder in der gleichen Größenordnung wie bei den übrigen Versuchen, aber für den Beton mit 2 Vol.-% Fasern mit i. M. bei 70 % der Druckfestigkeit bereits deutlich früher auf.

Als Maß für das Arbeitsvermögen der Betone wurde die Energieaufnahme gemäß Abschnitt 4.3.2.2 ermittelt (siehe auch Bild 18 sowie Tafeln 8, 9A und 9B). Die Energieaufnahme der in Betonierichtung belasteten Betonzylinder 15/30 cm aus Stahlfaserbeton (siehe Tafel 8) lag insgesamt zwischen 0,30 und 0,86 Joule/cm³ Beton. Sie nahm mit wachsendem Fasergehalt sehr deutlich zu und war beim Beton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. um 184 % und beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. um 564 % größer als beim Nullbeton. Die Größenordnung dieser Ergebnisse wurde durch die Ergebnisse über die Energieaufnahme der ebenfalls in Betonierichtung belasteten Bohrkern 10/20 cm aus Stahlfaserbeton (siehe Tafel 9A) bestätigt. Ihre Energieaufnahme lag dort insgesamt zwischen 0,37 und 1,09 Joule/cm³ Beton und war beim Beton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. um 195 % und beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. um 510 % größer als beim Nullbeton. – Durch die senkrecht zur Betonierichtung belasteten Bohrkern 10/20 cm aus Stahlfaserbeton (siehe Tafel 9B), deren Energieaufnahme insgesamt zwischen 0,30 und 0,50 Joule/cm³ Beton lag, wurden diese Ergebnisse nicht bestätigt. Dabei wies der Stahlfaserbeton bei 1 Vol.-% Fasern nur eine i. M. um 116 % und bei 2 Vol.-% Fasern nur eine i. M. um 164 % größere Energieaufnahme als der Nullbeton auf. Wie bei den Längsstauchungen (siehe Ab-

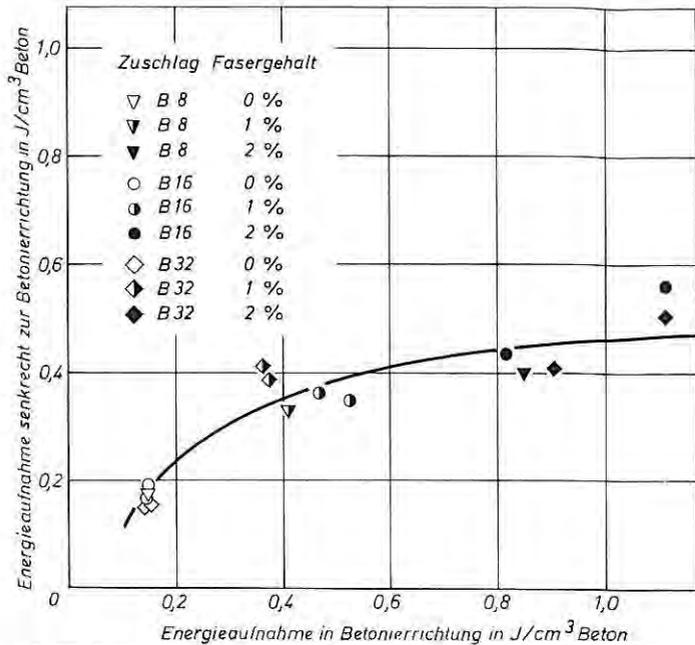


Bild 18 Energieaufnahme von Bohrkernen 10/20 cm aus Betonen der Serie 2, nach Bild 3 gebohrt und belastet in und senkrecht zur Betonierriichtung

schnitt 5.2.4.1) war auch die Energieaufnahme der zementleimärmeren Betone 2.8 und 2.16 (Tafel 3) immer kleiner als die der sonst vergleichbaren, jedoch zementleimreicheren Betone 2.12 und 2.19. – Beim Vergleich zwischen den verschiedenen Prüfkörpern und Belastungsarten wiesen die in Betonierriichtung belasteten Bohrkern 15/30 cm beim Nullbeton i. M. 80 %, beim Beton mit 1 Vol.-% Fasern i. M. 77 % und beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern i. M. 87 % und die senkrecht zur Betonierriichtung belasteten Bohrkern 10/20 cm beim Nullbeton 109 %, beim Beton mit 1 Vol.-% Fasern aber nur 80 % und beim Beton mit 2 Vol.-% Fasern sogar nur 47 % der Energieaufnahme der entsprechenden in Betonierriichtung belasteten Bohrkern 10/20 cm auf.

Zusammenfassend geht aus allen diesen Ergebnissen eindeutig hervor, daß auch die maximale Volumenverminderung der Prüfkörper während der Druckfestigkeitsprüfung und ihre Energieaufnahme durch Gehalt und Orientierung der Stahlfasern wesentlich beeinflusst werden. Eine deutliche Verbesserung der Energieaufnahme von Stahlfaserbeton gegenüber dem Nullbeton kann danach nur erwartet werden, wenn der Stahlfaserbeton in Betonierriichtung auf Druck beansprucht wird, weil die Fasern nur dabei vorwiegend in Ebenen senkrecht zur Druckbelastungsrichtung allseits orientiert, d. h. in Richtung der Querspannungen wirksam sind. Bei Druckbelastungen senkrecht zur Betonierriichtung dürfte durch Fasergehalte über 1 Vol.-% eine wesentliche Verbesserung der Ener-

gieaufnahme des Stahlfaserbetons nicht mehr zu erwarten sein, vermutlich weil die Fasern dann nur noch in der Hälfte der möglichen Querschnittsrichtungen und in der Druckrichtung vorwiegend orientiert sind.

5.3 Folgerungen für die Praxis

Die Untersuchungen über die Verteilung von Stahlfasern im Beton machen deutlich, daß die gleichmäßige Verteilung der Fasern eine wichtige Voraussetzung dafür ist, daß die Fasern eine wesentliche Verbesserung der Festbetoneigenschaften bewirken können. Für eine gleichmäßige Faserverteilung hat sich das im Rahmen der Untersuchungen entwickelte Zugabeverfahren 4 (Tafel 4) mit dem dafür eingesetzten Faserzugabegerät, bestehend aus einem Rüttel-sieb und einem Trichter (Bild 1), bewährt.

Zur Faserorientierung wurde festgestellt, daß die Stahlfasern in Prüfkörpern aus Stahlfaserbeton bei üblichen Betonierverfahren überwiegend in den Ebenen senkrecht zur Betonierrichtung allseits orientiert sind und daß sich dies auf die Festbetoneigenschaften, insbesondere auf die Zugfestigkeitskenngrößen und das Arbeitsvermögen von Stahlfaserbeton, auswirken kann. Eine wesentliche Verbesserung der Festbetoneigenschaften von Stahlfaserbeton ist nur dann zu erwarten, wenn die Stahlfasern überwiegend senkrecht zu Druckbeanspruchungen und in Richtungen der Zug- und der Querschnittsbeanspruchungen vorwiegend orientiert sind. Dies bedeutet, daß z. B. Druckbeanspruchungen bei Stahlfaserbeton in Betonierrichtung verlaufen sollen.

Für eine technisch und wirtschaftlich optimierte Anwendung von Stahlfaserbeton ist es aufgrund der Untersuchungen erforderlich, bereits bei der Planung und Bemessung der Bauteile sowie bei der Wahl des Herstellverfahrens die Faserorientierung zu berücksichtigen, besonders wenn bestimmte Zug- oder Biegezugfestigkeiten oder ein bestimmtes Verformungsverhalten bei der Bemessung zugrunde gelegt werden. Bei üblicher Herstellung von Bauteilen aus Stahlfaserbeton mit den üblichen Betonierverfahren stellt sich eine für die jeweilige Belastung günstige Faserorientierung vielfach von selbst ein, wie z. B. bei vertikal betonierten Stützen, horizontal betonierten zug- oder biegezugbeanspruchten Balken oder Platten. Bei besonderen Betonierverfahren, wie z. B. bei Stahlfaserspritzbeton, bei dem sich die Stahlfasern überwiegend in Ebenen senkrecht zur Spritzrichtung orientieren [14], oder bei der Herstellung von Betonfertigteilen muß ggf. die Betonierrichtung auf die spätere Beanspruchung so abgestimmt sein, daß eine günstige Faserorientierung entsteht.

Die Faserorientierung und ihre Auswirkung auf die Festbetoneigenschaften kann durch Prüfungen an Prüfkörpern aus Bauteilen oder an gesondert hergestellten Probekörpern ermittelt werden, die jedoch so entnommen oder hergestellt werden müssen, daß ihre Faserorientierung derjenigen des späteren Bauteils weitmöglichst entspricht. In vielen Fällen gibt bereits die augenscheinliche Beurteilung von Bruchflächen der Festbetonprüfkörper einen Hinweis darauf, welche Faserorientierung vorliegt, wie deutlich sie ausgeprägt ist und ob weitere Untersuchungen am Festbeton erforderlich sind.

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie in den Jahren 1978 bis 1981 durchgeführten Untersuchungen über die Verteilung und Orientierung von Stahlfasern und ihren Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton lassen sich wie folgt zusammenfassen:

6.1 Die gleichmäßige Verteilung der Fasern im Stahlfaserbeton ohne sogenannte Igel ist eine wichtige Voraussetzung für eine wesentliche Verbesserung der Festbetoneigenschaften durch Stahlfasern. Für die gleichmäßige Verteilung wurde ein Zugabeverfahren mit einem dafür geeigneten Faserzugabegerät entwickelt.

6.2 Zur Faserorientierung wurde festgestellt, daß die Stahlfasern in Prüfkörpern aus Stahlfaserbeton bei üblichen Betonierverfahren überwiegend in den Ebenen senkrecht zur Betonierrichtung und in diesen Ebenen in allen Richtungen orientiert sind und daß der Grad der Faserorientierung überwiegend vom Zementgehalt, Mörtelanteil, Zuschlaggrößtkorn, Stahlfasergehalt, von der Verarbeitbarkeit und dem Weg des Betons beim Verdichten abhängig ist. Die Orientierung kann z. B. durch augenscheinliche Beurteilung von Bruchflächen oder durch Röntgenaufnahmen festgestellt werden.

6.3 Die Festbetoneigenschaften können durch Stahlfasern nur dann wesentlich verbessert werden, wenn die Stahlfasern überwiegend in den Ebenen senkrecht zu Druckbeanspruchungen und dort in allen Querdehnungsrichtungen oder überwiegend in Richtung von Zugbeanspruchungen (Zug-, Spaltzug- oder Biegezugbeanspruchungen) orientiert sind.

6.6 Für eine technisch und wirtschaftlich optimierte Anwendung von Stahlfaserbeton sollten die Feststellungen zur Faserorientierung sowohl bei der Herstellung von Bauteilen als auch bei der Prüfung von Stahlfaserbeton berücksichtigt werden, bei Bauteilen z. B. durch geeignete Abstimmung der Betonierrichtung auf die vorgesehene Beanspruchung.

6.4 Bei einer für die jeweilige Beanspruchung günstigen Orientierung der Fasern (Belastung in Betonierrichtung) waren die Druckfestigkeiten der Stahlfaserbetone um i. M. bis zu rd. 15 % und die Biegezugfestigkeiten um i. M. bis zu rd. 90 % größer als bei ungünstiger Orientierung der Fasern, bei der die Biegezugfestigkeit der Faserbetone meist nicht größer war als bei den Nullbetonen ohne Fasern.

6.5 Die Verformungskennwerte und insbesondere das Arbeitsvermögen des im Kurzzeit-Druckversuch geprüften und dabei in Betonierrichtung belasteten Stahlfaserbetons war im Bereich höherer Belastung und der Weiterbelastung nach Erreichen der Druckfestigkeit deutlich größer als beim Nullbeton und bei den senkrecht zur Betonierrichtung belasteten Stahlfaserbetonen.

SCHRIFTTUM

- [1] Edgington, J., und D. J. Hannant: Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation and compaction by vibration. Materials and structure (RILEM) Vol. 541-44, 1972.
- [2] Snyder, M. J., und D. R. Lankard: Factors affecting the flexural strength of steel fibrous concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 69 (1972) S. 96/100.

- [3] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton, beton 24 (1974) H. 3, S. 95/99, und H. 4, S. 137/141; ebenso Betontechnische Berichte 15 (1974), Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 45/70.
- [4] Swamy, R. N., und P. S. Mangat: The onset of cracking and ductility of steel fiber concrete. Cem. and Concr. Res. 5 (1975) Nr. 1, S. 37/53.
- [5] Swamy, R. N., und H. Stavrides: Influence of the method of fabrication on strength properties of steel fiber concrete. Matériaux et Constructions 9 (1976) Nr. 52, S. 243/253.
- [6] Hoff, C. G., C. M. Fontenot und J. C. Tom: Selected bibliography on fibre-reinforced cement and concrete. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Miscellaneous Papers C-76-6, Juni 1976.
- [7] Malmberg, B., und A. Skarendahl: Determination of fibre content, distribution and orientation in steel fibre reinforced concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. Unveröffentlichter interner Bericht 1976.
- [8] Merkblatt Stahlfaserspritzbeton (Fassung Februar 1984), Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984) H. 5, S. 134/136.
- [9] Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. beton 28 (1978) H. 2, S. 63/67, und H. 3, S. 98/103; ebenso Betontechnische Berichte 19 (1978), Beton-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 31/56.
- [10] Meyer, A.: Faserbeton. Zement-Taschenbuch 1979/80. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1979, S. 453/477.
- [11] Dahms, J.: Herstellen und Eigenschaften von Faserbeton. beton 29 (1979) H. 4, S. 139/143; ebenso Betontechnische Berichte 20 (1979), Beton-Verlag, Düsseldorf 1980, S. 29/42.
- [12] Bonzel, J., und J. Dahms: Schlagfestigkeit von faserbewehrtem Beton. beton 31 (1981) H. 3, S. 97/101, und H. 4, S. 136/142; ebenso Betontechnische Berichte 21 (1980/81), Beton-Verlag, Düsseldorf 1982, S. 101/128.
- [13] Bonzel, J., und E. Siebel: Bestimmung von Luftporenkennwerten am Festbeton. beton 31 (1981) H. 12, S. 459/466; ebenso Betontechnische Berichte 21 (1980/81), Beton-Verlag, Düsseldorf 1982, S. 169/179.
- [14] Schmidt, M.: Stahlfaserspritzbeton – Eigenschaften, Herstellung und Prüfung. beton 33 (1983) H. 9, S. 333/337; ebenso Betontechnische Berichte 22 (1982/83), Beton-Verlag, Düsseldorf 1984, S. 155/168.
- [15] Stroeven, P.: Use of radiography-image analysis for steel fibre reinforced concrete. In: Swamy, N (Hrg.): Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, RILEM Symp. 1978, Lancaster 1978.
- [16] Stroeven, P.: Morphometry of fibre reinforced cementitious materials. Matériaux et Constructions 11 (1978) Nr. 61, S. 31/38, und 12 (1979) Nr. 67, S. 6/20.
- [17] Morton, J.: The work of fracture of random fibre reinforced cement. Matériaux et Constructions 12 (1979) Nr. 71, S. 393/396.
- [18] Knoblauch, H.: Herstellung und Eigenschaften von Stahlfaserbeton und Stahlfasermörtel mit steigenden Faseranteilen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 45 (1979) H. 10, S. 588/594, und H. 11, S. 683/691.
- [19] ACI-Committee 544: State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Concrete International 4 (1982) Nr. 5, S. 9/30.
- [20] Rehm, G.: Forschungsvorhaben Faserbeton, Teil I. Literaturlauswertung i. A. des Innenministers des Landes Nordrhein-Westfalen, AZ. VB 1-72.02 – Nr. 54/74, Universität Stuttgart 1979.