

Die Anwendung von Stahl- und Kunststoffasern im Naßspritzbeton

Dr.-Ing. Manfred STOCKER und Dipl.-Ing. Günther KÖRBER
Karl Bauer Spezialtiefbau GmbH + Co KG
Schrobenhausen/Bundesrepublik Deutschland

1. EINFÜHRUNG

Nach dem heutigen Stand der Technik lassen sich Faserspritzbetone praxisreif herstellen, auch wenn dies einen größeren Aufwand als für normalen Spritzbeton erfordert. Abbildung 1 zeigt z.B. eine 18 m hohe Wand in Stahlfaserspritzbeton ohne jegliche zusätzliche Stahlbewehrung. Es handelt sich um eine 14 cm dicke Wand in Bodenvernagelungsbauweise. Diese Wand muß den Erddruck aus den dahinterliegenden Kies- und Mergelschichten aufnehmen.

Nichtsdestoweniger entsteht häufig der Eindruck, daß der Faserspritzbeton sowohl in der Literatur als auch in sonstigen Veröffentlichungen nicht kritisch genug betrachtet wird, sei es von wissenschaftlicher, technischer oder wirtschaftlicher Seite aus. Deshalb erhebt sich die Frage: "Was haben wir vom Faserspritzbeton zu erwarten?"

2. THEORETISCHE ÜBERLEGUNGEN

Zunächst sollen einige grundlegende theoretische Überlegungen angestellt werden, wobei bewußt auf verfeinerte Verbundwerkstoff-, Mehrfachriß- oder Bruchmechanikansätze sowie auf hochgradige statistische Überlegungen verzichtet werden soll, um das Wesentliche darstellen zu können.

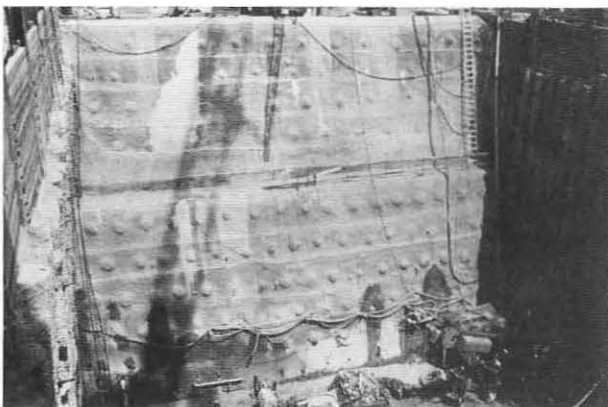


Abb.1. Bodenvernagelungswand mit Stahlfaserspritzbeton, Höhe 18 m.

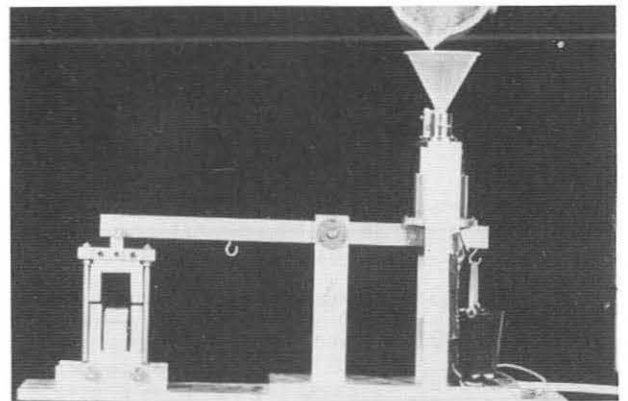


Abb.2. Ausziehversuche an Kunststoffasern zur Bestimmung der Verbundfestigkeit im Beton (Institut für Baustofftechnologie, TU Karlsruhe)

Es werden folgende, zum Teil sehr vereinfachende Annahmen getroffen:

1. Zwei Drittel aller Fasern liegen infolge des Spritzvorganges in einer Ebene senkrecht zur Spritzrichtung.
2. Davon liegen bei einaxialer Betrachtung parallel zur Zugrichtung 50 % der Fasern, das heißt, insgesamt ein Drittel aller Fasern.
3. Bis zum Bruch der Betonmatrix bei einer Dehnung von 0,2 % wirken sämtliche, in Zugrichtung liegende Fasern voll mit.
4. Nach dem Bruch der Betonmatrix können für Verbundzwecke nur noch 50 % aller in Zugrichtung liegenden Fasern, das heißt 1/6 aller Fasern, mit einer mittleren Verbundlänge von 67 % der Faserlänge angesetzt werden.
5. Der Faserbeton trägt bis zum Bruch der Betonmatrix wie ein Verbundwerkstoff unter Berücksichtigung der verschiedenen E-Module. Nach Erreichen der Bruchfestigkeit der Betonmatrix tragen die Fasern die Last bis zum endgültigen Bruch alleine.
6. Für den Beton wird eine Zugfestigkeit von $3,5 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Die Verbundwerte für die Fasern werden aus Ausziehversuchen gewonnen (Abb.2).

Tabelle 1.
Theoretische Tragfähigkeiten verschiedener Faserbetone bezogen auf 1 cm².

Beton mit folgenden Fasern	Faseranteil		Faser		Faserzugfestigk.		Max. Verbund [N/mm ²]	Zugfestigkeit Faserbeton		
	Massen [%]	Vol. [%]	Anzahl [Stck/cm ³]	Abstand [mm]	$\beta_{0,0002}$ [N/mm ²]	β_U [N/mm ²]		$F_{0,0002}$ [N/cm ²]	$F_{U,Faser}$ [N/cm ²]	$F_{U,Verbund}$ [N/cm ²]
keine	-	-	-	-	-	-	-	350	-	-
Stahlfasern 10 x 0,25mm	3	0,88	18	4,1	42	1400	5,0	12,4	206	79
	4	1,17	24	3,5				16,5	275	105
	5	1,46	30	3,2				20,6	343	131
	6	1,76	36	2,9				24,7	412	158
Kohlenstoff - Fasern 10 x 0,007 mm	0,043	0,056	14 55	0,45	46	2800	2,80	0,85	26	106
	0,174	0,22	5890	0,22				3,46	106	404
	1,154	1,5	39050	0,088				23,00	700	2684
Polyvinylalkohol - Fasern 10 x 0,025 mm	0,043	0,076	155	1,39	6	1100	2,60	0,15	14	35
	0,174	0,31	628	0,69				0,61	57	144
	0,847	1,5	3055	0,31				3,00	275	696
Acrylfasern 10 x 0,025 mm	0,043	0,084	171	1,32	3,6	900	1,10	0,10	13	17
	0,174	0,34	691	0,66				0,40	51	67
	0,77	1,5	3058	0,31				1,80	225	295
Polypropylen - Fasern 10 x 0,22 mm	0,043	0,11	2,8	10,3	0,5	400	0,25	0,1	7	0,5
	0,174	0,44	11,4	5,1				0,1	29	2,2
	0,60	1,5	39,5	2,75				0,3	100	7,6

Mit diesen Annahmen ergeben sich Werte für die Zugfestigkeiten von Faserbetonen mit Stahl-, Kohlenstoff-, Polyvinylalkohol-, Acryl- und Polypropylenfasern (Tab.1). In der vorletzten Spalte sind die durch die Fasern aufnehmbaren Zugkräfte in einem Querschnitt senkrecht zur Zugrichtung, in der letzten Spalte die aufnehmbaren Verbundkräfte dieser Fasern angegeben. Aus der Tabelle erkennt man sofort, daß für die Bruchfestigkeit bei Fasern mit relativ großen Durchmessern der Verbund, für Fasern mit kleinen Durchmessern die Reißfestigkeit der Fasern maßgebend ist.

Möchte man mit den Fasern annähernd die gleiche Bruchfestigkeit erzielen wie mit der unbewehrten Betonmatrix, dann müßte man theoretisch etwa 0,55 Massen-% Kohlenstofffasern, 1,10 Massen-% Polyvinylalkoholfasern und 1,20 Masse-% Acrylfasern dem Beton beimischen. Dies würde bedeuten: 13 kg Kohlenstofffasern, 25 kg Polyvinylalkoholfasern oder 28 kg Acrylfasern pro cbm Beton. Bei einem Preis von derzeit ungefähr 150,-DM/kg Kohlenstofffaser und ca. 15,-DM/kg Kunststoffaser würde dies den Preis um ca. 1.950,-DM, 380,-DM bzw. 420,- pro cbm lediglich für das Material verteuern. Der Mehrpreis für Kunststoffasern wäre noch erschwinglich, wenn man bedenkt, daß 6 Massen-% Stahlfasern den Beton derzeit auch um ca. 275,-DM pro cbm verteuern. Viel gravierender ist die Tatsache, daß es nicht annähernd möglich ist, Kunststoffasern in der erwähnten Menge in den Beton einzuarbeiten.

3. PRAKTISCHE VERSUCHE

Im Rahmen eines vom Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn, geförderten Forschungsprogramms wurden gemeinsam von den Firmen Bauer, Spezialtiefbau, Schrobenthausen, und Schöndorfer, Bad Reichenhall, in zahlreichen Labor- und Feldversuchen die Einsatzmöglichkeiten unterschiedlicher Stahl- und Kunststoffasern in Spritzbeton untersucht.

3.1 Versuchsfasern

Statistisch auswertbar waren Versuche mit den in Tabelle 2 beschriebenen Fasern. In den Abbildungen 3 und 4 sind die Spannungs/Dehnungslinien der einzelnen Fasern dargestellt.

3.2 Faservereinzelung

Die Stahlfasern können heute mit mechanischen Vereinzelungsgeräten (z.B. System Bergbauforschung) bis zu Längen von ca. 25 mm und Durchmessern von 0,2 bis 0,4 mm ohne Schwierigkeiten vereinzelt und dosiert werden, vorausgesetzt, daß die Fasern trocken und nicht angerostet sind.

Die Kohlenstofffasern sind als Stapelfasern erhältlich, und sie werden als Roving geliefert, dessen Garn aus mehreren tausend Einzelfasern besteht. Mit automatischen Schneidgeräten können diese Rovings auf die gewünschte Faserlänge geschnitten werden.

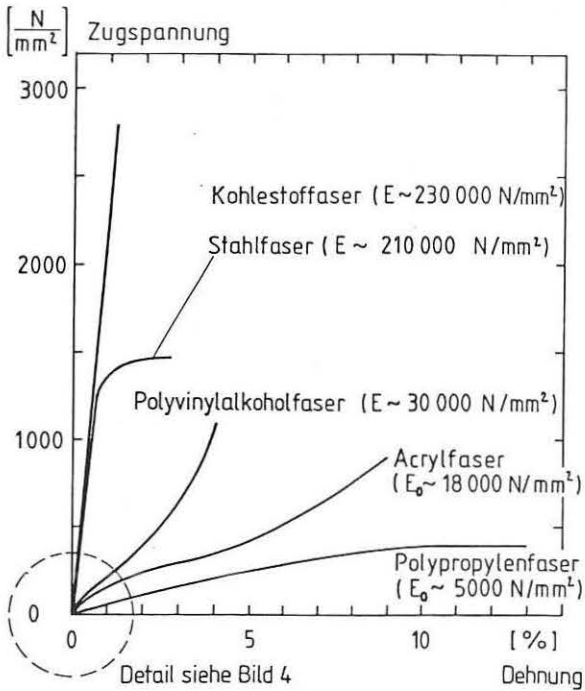


Abb. 3. Spannungs/Dehnungs-Linien verschiedener Fasern.

Es hat sich gezeigt, daß das Einmischen der Fasern in das Trockenspritzgut sehr schwierig ist. Sowohl beim Einbringen in reinen Zement, in Füller 0 bis 1 mm oder in den Zuschlag 0 bis 8 mm, ergeben sich Faseranhäufungen und Faserknäuel. Besonders stark tritt dies bei nicht ofengetrockneten Zuschlägen auf. In trockenem Zement ließ sich nur eine relativ kleine Fasermenge auflösen bzw. in der Schwebel halten. Auch längere Mischzeiten brachten keine Verbesserung. Besondere Schwierigkeiten bereitete das Einmischen von 12 mm langen Fasern.

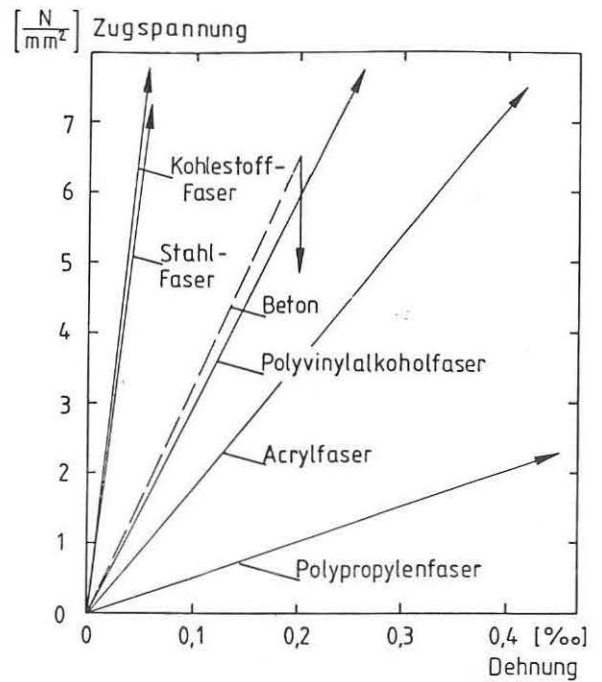


Abb. 4. Spannungs/Dehnungs-Linien verschiedener Fasern.

Die wichtigste Anforderung beim Einbringen von Fasern in den Beton ist eine gute Vereinzelung der Fasern. Am erfolgreichsten war eine Methode, bei der die Fasern in einen vorgemischten Zementleim eingebracht wurden. Der W/Z-Wert lag zwischen 0,35 und 0,40. Die besten Mischerfolge wurden mit einem Turbomischer erreicht. Die maximale einmischbare Menge betrug ca. 1 kg Fasern pro 100 kg Zement, das heißt etwa 4 kg Fasern pro cbm Beton. Die Fasern wurden bei dieser Methode augenscheinlich sehr gut vereinzelt, und es kam nicht zu Knäuelbildungen.

Tabelle 2. Eigenschaften verschiedener Fasern.

	ϕ [mm]	L [mm]	L/D	ρ [t/m³]	β_{zu} [N/mm²]	Reiß- dehng. [%]	E- Modul [KN/mm²]	Haft- Spanng. [N/mm²]	Gleit- Spanng. [N/mm²]
Stahlfaser									
Wirex glatt	0,4	12,5	31	7,85	1100	3	210	4,0	1,9
Bekaert glatt	0,25	12,7	51	7,85	1400	3,5	210	5,0	1,7
Kohlestoff Faser									
Enka Carbolon	0,007	6	860	1,77	2 800	1,4	230	2,8	0,05
Polyvinyl-Alkoholfaser E M S - CHEMIE	0,025	6	240	1,30	1100	4,0	30	2,6	0,05
Acrylfaser Hoechst Dolanit	0,025	6	240	1,18	900	10	18	1,1	0,03
Polypropylen - Faser	0,22	6	27	0,92	400	13	5	0,25	0,22

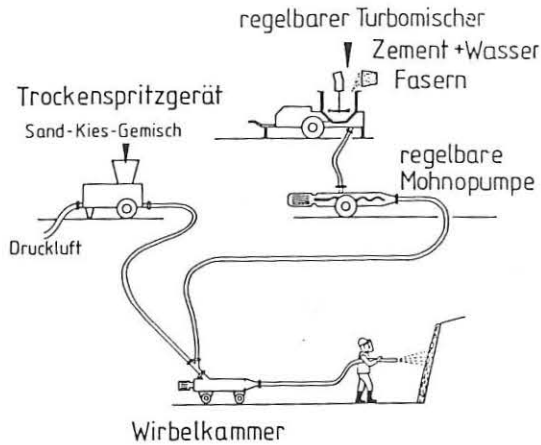


Abb.5. System Kunststofffasernaßspritzbeton.

Bei der Kohlenstofffaser besteht die Gefahr, daß die Fasern bereits beim Einmischen infolge ihrer Sprödigkeit und geringen Scherfestigkeit brechen.

Kunststofffasern gibt es in Stapellängen ab 6 mm. Weiter sind Granulate mit Faserlängen zwischen 0 und 6 mm erhältlich.

Bei Faserdurchmessern $< 50 \mu\text{m}$ ist es zweckmäßig, die Fasern vor der Verwendung mit Prebluft aufzulockern und erst dann in die Zementsuspension einzumischen. Die Dosierung erfolgt in der Regel chargenweise. Fasern mit Durchmessern $> 50 \mu\text{m}$ können der Suspension direkt zugegeben werden. Wichtig ist in jedem Fall, daß die Fasern nicht in zu großen Einzelmengen in die Mischung eingestreut werden. Eine Mischzeit von 2 min hat sich für die Vereinzelnung der Fasern als ausreichend erwiesen.

3.3 Mischvorgang und Spritzvorgang

Im Gegensatz zu den Stahlfasern, die auch im Trockenspritzbeton verarbeitet werden können, wurden die Kohlenstoff- und Kunststofffasern nur im Naßspritzverfahren verwendet (Abb.5). Hierbei wird das Trockenmaterial, bestehend aus Zuschlägen der Körnung 0 bis 8 mm und eventuell Zusatzstoffen, von handelsüblichen Trockenspritzgeräten mit Druckluft zur Wirbelkammer gefördert.

Die Fasern werden in einem Turbomischer in die Zementsuspension eingemischt und diese mit einer Mohnopumpe zur Wirbelkammer gepumpt. In der Wirbelkammer wird das Trockenmaterial mit der faserhaltigen Zementsus-



Abb.6. Hangsicherung als Dauermaßnahme mit Kunststofffaserspritzbeton.

pension intensiv vermischt. Diese Mischung geschieht bei einer Umdrehungszahl der Mischflügel von ca. 380 U/min. Von der Wirbelkammer aus wird der Naßbeton im Dünnstromverfahren zur Düse gefördert (Abb. 6).

3.4 Versuchsergebnisse

In sämtlichen Versuchsreihen wurden Probekörper nach DIN 18 551 hergestellt. Aus Spritzbetonplatten wurden Bohrkern mit einem Durchmesser von 75 mm und einer Höhe von ca. 150 mm gewonnen. An diesen zylindrischen Proben wurden die Spaltzug- und die Druckfestigkeit ermittelt.

Für Biegezugversuche wurden aus Versuchsplatten Balken mit den Abmessungen 400 x 75 x 75 mm gewonnen und nach DIN 1048 geprüft.

Die Prüfung erfolgte mit einer weggesteuerten Prüfpresse. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei der Druckfestigkeitsprüfung 0,66 mm/min, bei der Spaltzug- und Biegezugprüfung 0,2 mm/min.

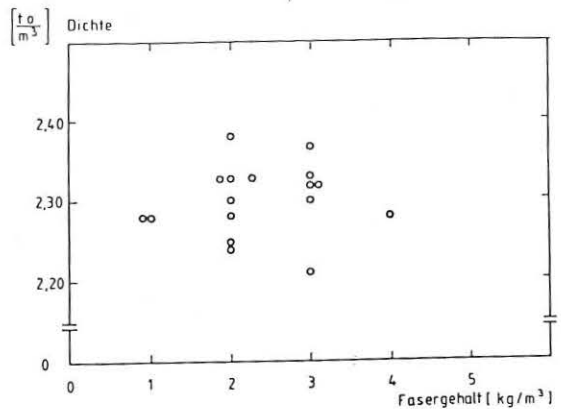


Abb.7. Dichte von Beton mit Acrylfasern.

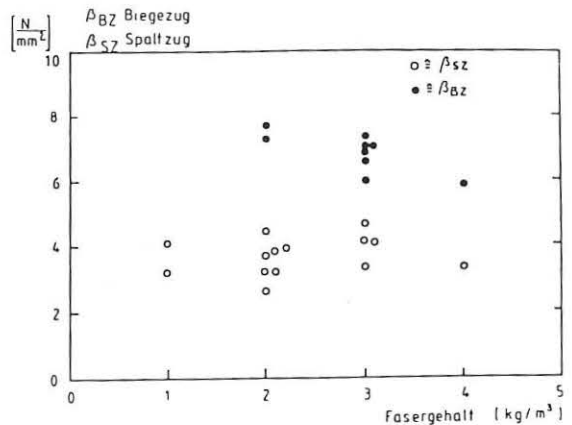


Abb.8. Biegezug- und Spaltzugfestigkeit für Beton mit Acrylfasern. (Probenalter 28 bzw. 34 Tage)

In den Abbildungen 7 und 8 sind beispielsweise die Meßergebnisse der Dichte, der Spaltzug- und Biegezugfestigkeit für Betone mit Acrylfasern dargestellt. Der Beton bestand aus Zuschlag der Körnung 0 bis 8 mm mit 400 kg Zement/m³. Als Zemente wurden PZ 35 F und PZ 45 F verwendet. Der W/Z-Wert des Zementleimes betrug 0,35 bzw. 0,40. Zusatzmittel wurden kaum verwendet.

Tabelle 3. Mittlere Festigkeitseigenschaften von verschiedenen Faserbetonen mit einem Fasergehalt von 1 bis 4 kg/m³ Beton.

	Beton mit folgenden Fasern :			
	keine	Kohlestoff	Polyvinyl Alkohol	Acryl
Dichte [t/m^3]	2,32	2,32	2,29	2,31
Druckfestigkeit [N/mm^2]	33,1	34,3	30,5	37,3
Spaltzugfestigkeit [N/mm^2]	3,5	4,3	3,4	3,6
Biegezugfestigkeit [N/mm^2]	6,5	6,2	6,3	6,8

Im Tabelle 3 sind die Mittelwerte der Versuchsergebnisse der einzelnen Faserbetone zusammengestellt und den Werten der faserfreien Betone gegenübergestellt. Die Übereinstimmung ist unter Berücksichtigung einer gewissen, im Betonversuchswesen üblichen Streuung so gut, daß daraus gefolgert werden kann, daß die Fasern in der geprüften Konzentration in bezug auf Festigkeitseigenschaften keinen Vorteil gegenüber faserfreiem Beton bringen. Die Festigkeiten der faserbewehrten Betone entsprechen ziemlich genau denjenigen der faserfreien Betone. Die Festigkeit des Faserbetons wird offensichtlich durch die Betonmatrix, nicht durch die Fasern, bestimmt. Dieses Ergebnis deckt sich sehr gut mit den anfangs gemachten theoretischen Überlegungen (Tab.1).

4. GEDANKEN ZU DEN VERSUCHSERGEBNISSEN

Der Vorteil von kohlenstoff- bzw. kunststoff-faserbewehrtem Beton ist zumindest in der derzeit möglichen Faserkonzentration nicht in der Festigkeitserhöhung zu suchen. Ein Zugspannungs/Dehnungs-Diagramm veranschaulicht dies (Abb.9).

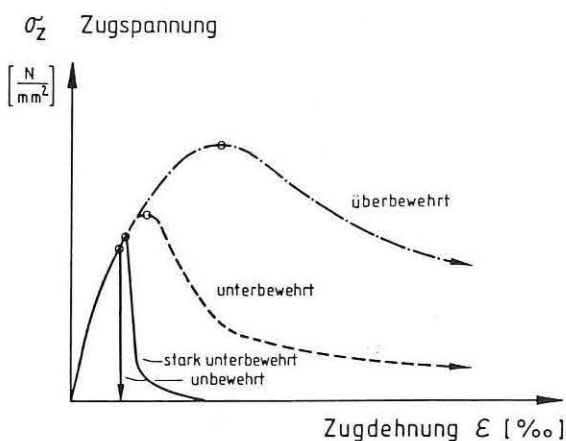


Abb.9. Spannungs/Dehnungs-Linien für Faserbetone in Abhängigkeit vom Bewehrungsgrad.

Ein überbewehrter Beton bringt Festigkeiten, die oberhalb der Matrixfestigkeit liegen. Der Bewehrungsgrad und die Restfestigkeit der Fasern ohne Mitwirkung der Betonmatrix bestimmen auch die Größe des Arbeitsvermögens, das

als Fläche unter der Spannungs/Dehnungslinie definiert ist. Unterbewehrte Querschnitte können ebenfalls eine Festigkeitserhöhung gegenüber der Matrixfestigkeit bringen, wenn bei Zugrundelegung der Bruchmechanik-Theorie die Fasern als Ribbremse sowohl im Früherhärtungsstadium als auch unter Last wirken. Dies veranschaulichen stahlfaserbewehrte Betone, die theoretisch zwar unterbewehrt sind, aber trotzdem eine z.B. mit der Faserkonzentration steigende Spaltzugfestigkeit aufweisen (Abb.10).

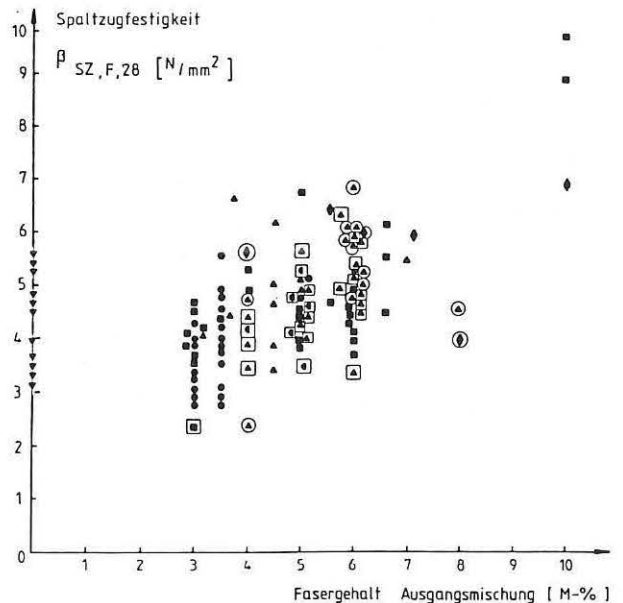


Abb.10. Einfluß des Fasergehaltes auf die Spaltzugfestigkeit von Stahlfaserbeton.

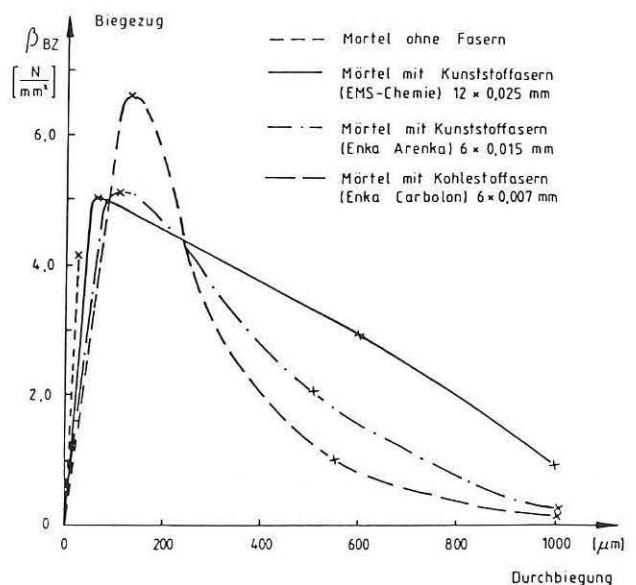


Abb.11. Biegezugversuch an Mörtelprismen 40 x 40 x 160 mm mit verschiedenen Fasern, Fasergehalt 1,5 Vol.-%, W/Z-Wert = 0,6, Probenalter 7 Tage. (Institut für Baustofftechnologie, TU Karlsruhe).

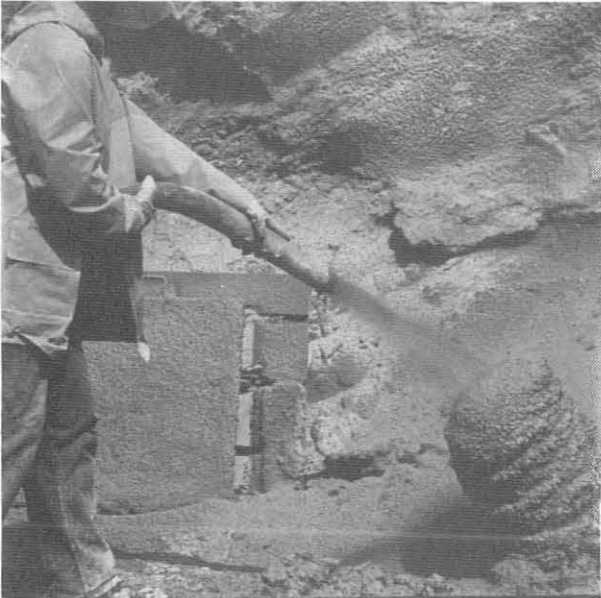


Abb.12. Beispiel für günstige Verarbeitbarkeit von Kunststoffaser-Spritzbeton.

Ebenfalls deutlich zu sehen ist dies bei relativ stark, jedoch mit Ausnahme der kohlenstofffaserbewehrten Betone, immer noch unterbewehrten Querschnitte von kunststoffbewehrten Betonen (Abb.11). Es zeigen sich eindeutig Festigkeitserhöhungen gegenüber der Betonmatrix. Zu berücksichtigen ist nur, daß die an Laborproben gewonnenen Ergebnisse nicht auf die Praxis übertragbar sind.

In der Praxis sind derzeit einmischbare Volumengehalte von Kunststoff- und Kohlenstofffasern von 0,2 bis 0,4 % möglich, nicht aber von 1,5 % wie im Labor. Diesem hohen Fasergehalt liegen bereits theoretische Faserabstände von 0,10 bis 0,30 mm in Zugrichtung bei voller Faservereinzelung zugrunde. Also ein Zustand, der in der Praxis kaum zu erreichen sein dürfte.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Faserspritzbeton hat als Verbundbaustoff deutliche Grenzen gegenüber Stahlbeton. Da es nicht gelingt, Fasermengen in statisch ausreichender Form dem Beton beizumischen, sei es in bezug auf Materialfestigkeit oder Verbundfestigkeit der Fasern, sind Festigkeitseigenschaften sowie Arbeitsvermögen von Faserbetonen begrenzt. Die Fasern können jedoch als Ribbremse im Mikrobereich sowohl im Frühhärtungs- als auch im ausgehärteten Stadium dienen. Damit werden kleinere Risse sowie eine feinere Ribverteilung erzielt. Dies wiederum bewirkt eine höhere und in gewissem Sinne "garantierte" Zugfestigkeit der Betonmatrix. Da vor allem Kunststoffasern chemisch sehr widerstandsfähig sind, kann Faserbeton, unter Umständen auch zusammen mit Stahlbeton, vorteilhaft dort eingesetzt werden, wo der Beton starken Witterungseinflüssen ausgesetzt ist, z.B. bei Böschungssanierungen, Stützmauern, Fahrbahnbelägen und ähnlichen Projekten. Dank seiner hohen "Klebrigkeit" und guten Verarbeitbarkeit (Abb.12) eignet sich Faserspritzbeton auch wegen des geringen Rückpralls besonders gut für Sanierungszwecke.

LITERATUR

1. Wischers, G., und Manns, W.: Ursachen für die Entstehung von Rissen in jungem Beton. Betontechnische Berichte, Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf 1973.
2. Neville, A.M.: Properties of Concrete. Pitman Publishing Limited, London 1977.
3. Kleiser, K.: Bruchmechanische Untersuchungen an einer stahlfaserbewehrten Zementmörtelmatrix. Dissertation Universität Karlsruhe 1981.
4. Brameshuber, W., und Hilsdorf, H.K.: Haft- und Gleitverbundverhalten von Stahl-, Kunststoff- und Kohlenstofffasern. Versuchsbericht, unveröffentlicht, 1982.
5. Stocker, M., und Körber, G.: Entwicklung von fasernaßspritzbeton. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, S.70, November 1983.