
Die Eigenschaften jungen Faserspritzbetons

THE PROPERTIES OF YOUNG STEEL FIBRE REINFORCED SHOTCRETE

YINING DING, WOLFGANG KUSTERLE

Zur Beurteilung der Wirkungsweise von Stahlfaserspritzbeton im Tunnelvortrieb liegen bisher wenige Versuchsergebnisse vor. Die Prüfungen beschränken sich meist auf 7 oder 28-Tage alten Beton. Am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck wurden Voruntersuchungen an nachgestellten Spritzbetonmischungen mit verschiedenen Fasergehalten und Fasertypen sowie Stahlbewehrung durchgeführt. Ähnliche Untersuchungen erfolgten an Baustellenspritzbetonen (Feucht-Mischgut mit SBM-FT) mit 0, 60 und 90 kg/m³ Stahlfasern 30/0,5. Ab 8 Stunden Alter wurde die Druckfestigkeitsentwicklung, der E-Modul, das Schwinden und Kriechen, die Wassereindringtiefe, die Arbeitslinie im Platten-Biege-Versuch und im Balkenbiegeversuch ermittelt. Letzterer Versuch wurde nach verschiedenen Regelwerken ausgewertet. Im jungen Alter (bis 48 Stunden) sind die Ergebnisse der Faserbetone mit jenen der Stahlbetone mit Bewehrung in zentrischer Lage vergleichbar.

At present, there are barely any research results available about the performance of young steel fibre reinforced shotcrete for tunnelling. Most of the experiments up to now have been restricted to concrete 7 to 28 days old. At the laboratory of the Institute for Building Materials and Material Testing, University of Innsbruck, preliminary tests on fibre reinforced concrete with shotcrete mix design, with different fibre content, fibre types and bar/mesh reinforcement at early age, were performed. Similar experiments for steel fibre reinforced shotcrete were carried out at the building site (dry mix with moist aggregate and spray-cement SBT-FT) with a fibre content of 0, 60, and 90 kg/m³, length/diameter 30/0.5. Starting after 8 hours, compressive strength, modulus of elasticity, shrinkage and creep, water tightness, flexure strength (both beams and slabs) were tested at different points of time. The parameters for the last two experiments were calculated according to different international standards. At early age (up to 48 hours), comparable results for fibre reinforced concrete and steel bars/mesh reinforced concrete could be achieved (steel bars/mesh were situated in the middle of the beams and slabs).

1. Einleitung

Stahlfasern werden Betonen und Spritzbetonen zugegeben, um eine Rißbeschränkung zu schaffen

und die Duktilität zu erhöhen. Die Beurteilung der Materialeigenschaften von Stahlfaserbeton (SFB) bzw. Stahlfaserspritzbeton (SFSpB) im jungen Alter (ab 10 Stunden) hat große Bedeutung für Siche-

rungsspritzbeton bezüglich dessen Tragfähigkeit und Gebrauchsfähigkeit. Da die Spritzbetonschale gerade nach den ersten Abschlägen, bezogen auf den aktuell vorhandenen Erhärtungsgrad, am stärksten beansprucht wird, kommen im jungen Alter die meisten Verbrüche vor.

Trotz der großen Bedeutung des Fasereinflusses auf die Betoneigenschaften gibt es z.Z. noch kaum Untersuchungsergebnisse über die Faserbetoneigenschaft im jungen Alter (von 8 Stunden bis 72 Stunden). Das Wissen über den Einfluß der Faserzugabe auf die Betoneigenschaft im jungen Alter ist noch sehr beschränkt. Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluß von Stahlfasern auf Beton und Spritzbeton. Beobachtet werden die Auswirkungen unterschiedlicher Zugabemengen und Typen von Fasern unter speziellen Belastungsbedingungen besonders im Alter vor 72 Stunden.

Die Versuche gliedern sich in Versuche an nachgestellten Spritzbetonmischungen im Labor und in Versuche an Trocken- und Naßspritzbetonen aus dem Baustellenbetrieb mit all deren Streuungen. Untersucht wurden Proben mit unterschiedlichen Stahlfasergehalten (teilweise dreier Typen) sowie Proben mit Mindeststabbewehrungsgehalt oder darüber liegendem Bewehrungsgrad.

Die Untersuchungen zeigen, daß die Fasern sowohl auf die Frischbetoneigenschaften als auch auf die Betoneigenschaften Auswirkungen haben. Der Erhärtungsgrad des Betons spielt dabei eine wichtige Rolle bei der Beurteilung des Fasereinflusses.

2. Fasereinfluß auf die Druckfestigkeit des Stahlfaserbetons

Da besondere Anforderungen bezüglich Frühfestigkeit im Tunnelbau gestellt werden, wurde ein Österreichischer Tunnelzement PZ 375 H (TZ 2) im Versuchsprogramm eingesetzt. Der Zementgehalt betrug 450 kg/m³ Beton, der w/z-Wert 0,45. Zur Regelung der Verarbeitbarkeit des Betons kam ein

Verflüssiger zum Einsatz. Der Zuschlag bestand aus den Korngruppen 0 - 1 mm 45 %, 1 - 4 mm 40 %, 4 - 8 mm 15 %. Damit ist von der Mischungsrezeptur her gut ein Spritzbeton nachgestellt.

Zur Herstellung der Faserbetonproben wurden Drahtfasern mit Endhaken ZP 30/0,5 (d = 0,5 mm, l = 30 mm) eingesetzt. Es wurden drei Fasergehalte ausgewählt:

- 20 kg/m³ (=0,21 Vol.% oder 0,8 Gew.%)
- 40 kg/m³ (=0,42 Vol.% oder 1,6 Gew.%)
- 60 kg/m³ (=0,63 Vol.% oder 2,4 Gew.%)

Durch die Faserzugabe erhöht sich die Druckfestigkeit (Tabelle 1) des Betons im jungen Alter etwas gegenüber dem Nullbeton. Allerdings kann kein eindeutig steigender Trend (Bild 1) mit zunehmendem Fasergehalt festgestellt werden.

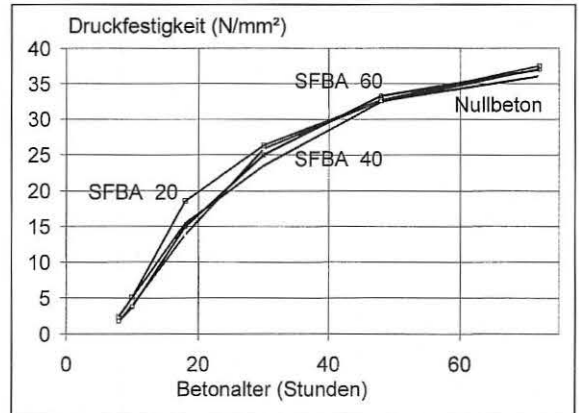


Bild 1: Druckfestigkeitsentwicklung von Null- und Faserbeton

Die besten Druckfestigkeitswerte im Alter von 8 und 10 Stunden wurden mit 40 kg/m³ Fasergehalt erzielt. Ein Stahlfasergehalt von 60 kg/m³ bewirkt keine weitere Erhöhung der Druckfestigkeit; die Frischbetonprüfung dieser Proben zeigte einen erhöhten Luftporengehalt. Für den erhärteten Beton nach 30 Stunden haben die Fasern keine wesentliche Auswirkung auf die Druckfestigkeit. Trotz der

Betonalter (Stunden)	Druckfestigkeit (N/mm²)					
	8	10	18	30	48	72
Nullbeton	1,86	4,03	13,89	25,87	32,56	36,06
SFBA mit 20kg/m³ Stahlfasern	2,35	5,11	18,63	26,33	32,65	37,52
SFBA mit 40kg/m³ Stahlfasern	2,5	5,08	15,5	23,5	32,44	37,13
SFBA mit 60kg/m³ Stahlfasern	1,8	3,8	15	25	33,3	37

SFBA: Abkürzung von Stahlfaserbeton mit A-Fasern

Tab. 1: Druckfestigkeitsentwicklung von Null- und Faserbeton

niedrigeren Druckfestigkeit zeigt der Stahlfaserbeton mit 60 kg/m^3 A-Faser die beste Druckzähigkeit im Alter von 8 und 10 Stunden:

1. Die Last kann nach dem sichtbaren Anreißen der Probeoberfläche weiter ansteigen.
2. Beim Erreichen der max. Druckfestigkeit fällt diese Last nicht wie üblicherweise bei erhärtetem Beton rasch ab, sondern bleibt minutenlang erhalten.

Diese zwei beobachteten Erscheinungen sind für den Einsatz von Faserbeton im Tunnelbau vorteilhaft.

Im Vergleich zu den Laborversuchen ist der Fasereinfluß bei vorliegenden Spritzversuchen auf der Baustelle nicht genau beurteilbar. Druckfestigkeit und E-Modul werden stärker von den anderen Faktoren der Baustelle als dem Fasergehalt bestimmt.

3. Fasereinfluß auf die Spannungs/Dehnungseigenschaft (σ - ϵ Diagramm) unter Druckbelastung

Um den Fasereinfluß auf die Eigenschaften des Betons unter der Druckbelastung und den Unterschied der Druckzähigkeit im jungem Alter und im erhärteten Zustand zu untersuchen, wurden die Proben mit geringer Belastungsgeschwindigkeit von ca. $0,1 \text{ N/mm}^2$ je Sekunde bis zu einer Druckverformung von ca. 4 - 7 % (Bild 2, 3) getestet.

Im jungen Alter ist der Fasereinfluß auf die Spannungs/Dehnungseigenschaft unter Druck deutlich zu ersehen. Stahlfaserbeton kann bei der gleichen Dehnung, sowohl vor als auch nach der Spitzenbelastung, mehr Spannungen aufnehmen (Bild 2).

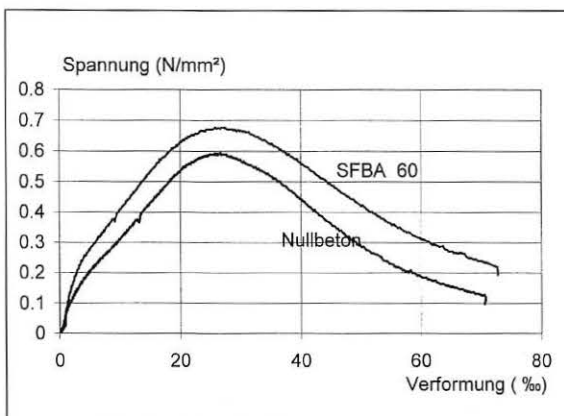


Bild 2: Gegenüberstellung der Spannung-Verformungslinien von Null- und Faserbeton mit 60 kg/m^3 A-Faser nach 9 Stunden

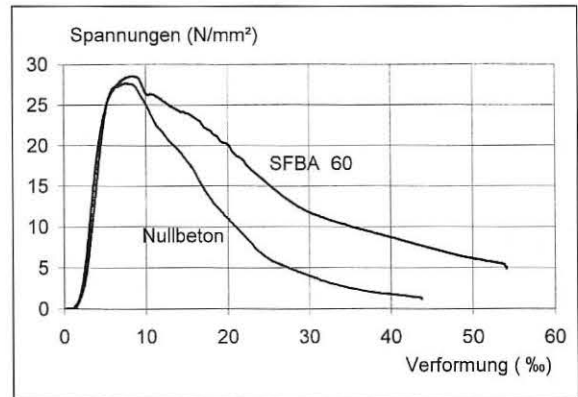


Bild 3: Gegenüberstellung der Spannung-Verformungslinien von Null- und Faserbeton mit 60 kg/m^3 A-Faser nach 81 Stunden

Das Bild 3 zeigt die Gegenüberstellung des σ - ϵ Verhaltens von Null und Faserbeton mit 60 kg/m^3 A-Fasern im Alter von 81 Stunden. Die beiden Kurven vor der Spitzenspannung verlaufen fast gleich. Das bedeutet, daß die Fasern keinen merkbaren Einfluß vor der Spitzenspannung auf den erhärteten Beton nach 81 Stunden haben. Erst nach der Spitzenspannung hat SFB eine deutlich bessere Druckzähigkeit gezeigt.

Die obengenannten Versuche zeigen einen deutlichen Unterschied des Fasereinflusses zwischen dem jungen Alter und dem erhärteten Zustand:

- Stahlfasern erhöhen die Zähigkeit des Betons unter Druck nicht nur in der plastischen Phase (nach der Spitzenbelastung), sondern auch in der elastischen Phase (vor der Spitzenbelastung) im jungen Alter.
- Stahlfasern erhöhen die Druckzähigkeit des Betons unter der Druckbelastung nur in der plastischen Phase (nach der Spitzenbelastung) im erhärteten Zustand.

4. Einfluß der Fasern auf die äquivalente Biegezugfestigkeit

4.1 Durchführung des Versuches

Die Prüfung wurde nach dem im DBV-Merkblatt beschriebenen Verfahren durchgeführt (Bild 4). Das Belastungs-Durchbiegungsdiagramm eines Biegebalkens bei mittlerer Zunahme des Kolbenwegs von $0,2 \text{ mm/min}$ ist bis zu einer Durchbiegung der Probe von $3,5 \text{ mm}$ grafisch aufzunehmen. Die Ermittlungen des Arbeitsvermögens D_{BZ} und der Biegezugfestigkeit β_{BZ} erfolgten nach dem DBV-Merkblatt. Hier wurden

jedoch nur die Arbeitslinien im Vergleich dargestellt.

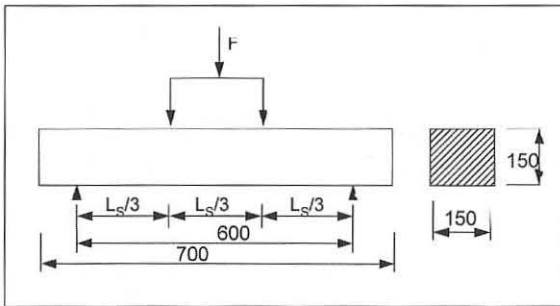


Bild 4: Versuchsaufbau und Abmessungen der Balkenprobe

4.2 Die äquivalenten Biegezugversuche an Stahlfaser- und Stahlbetonproben im Labor

Das Bild 5 zeigt die Gegenüberstellung der Mittelwerte des Arbeitsvermögens von Stahlfaserbetonproben mit A-Fasern (SFBA) mit unterschiedlichem Fasergehalten und von Stahlbetonproben (SB) ($\mu = 0,25\%$, zentrische Anordnung) im Alter von 10 Stunden.

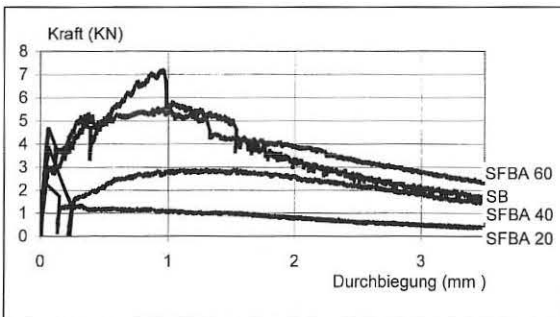


Bild 5: Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens für SFBA und SB nach 10 Stunden

Gegenüber von SFBA 60 ist die Belastungsfähigkeit der Stahlbetonprobe nach dem ersten Reiß bis zu einer Durchbiegung von ca. 1 mm weiter angestiegen, und danach auch schneller abgesunken. Für baupraktischen Einsatz sind die 2 Varianten, mittige Stabbewehrung mit gewählttem Querschnitt und 60 kg/m^3 Fasergehalt bezüglich des Biegeverhaltens im Alter von 10 Stunden aber etwa gleichwertig.

Im Alter von 18 Stunden (Bild 6) weist die Stahlbetonprobe gegenüber von SFBA 40 und SFBA 60 ähnlich wie im Bild 5 nach dem ersten Reiß einen weiteren kleineren instabilen Bereich auf. Die Belastungsfähigkeit der Stahlbetonprobe ist bis zu einer Durchbiegung von ca. 1 mm weiter angestie-

gen, und danach auch steiler als SFBA 40 und SFBA 60 abgesunken.

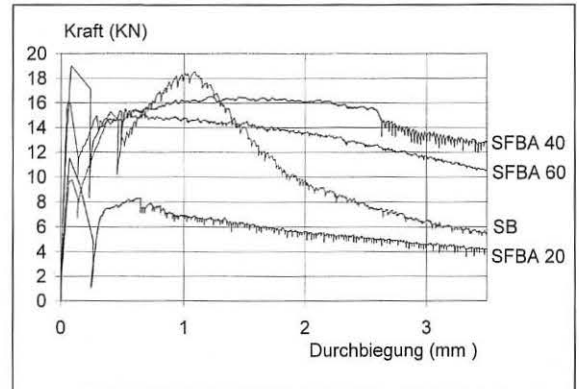


Bild 6: Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens für SFBA und SB nach 18 Stunden

Ähnlich wie bei den Versuchen nach 10 Stunden (Bild 5) ist aus Bild 6 ersichtlich, daß sich die aufgetretene Durchbiegung und die Maximalkraft F beim ersten Reiß auch mit dem Fasergehalt für das gleiche Betonalter [2] erhöhen. Das bedeutet, daß der elastische Bereich des Betons mit zunehmendem Fasergehalt größer wird. Dieses Ergebnis wurde auch durch den Spannungs/Dehnungsversuch (σ - ϵ Diagramm) unter Druckbelastung (Bild 2) bestätigt.

Diese Erscheinung kommt nur im jungen Alter (vor 18 Stunden) vor, weil zu dieser Zeit für Stahlbeton die Verbundwirkung und die Reibungswirkung zwischen Stahlbewehrung und der Betonmatrix noch relativ schwächer als die im erhärteten Beton sind. Stahlbetonproben sind nach einer gewissen Durchbiegung nicht mehr weiter belastbar. Gerade in diesem frühen Betonalter können sich die Stahlfasern in der Betonmatrix besser

1. gegen die Ausbreitung von Mikrorissen
 2. bei der Überbrückung der Makrorisse
- auswirken (Bild 5 und 6).

Im Bild 7 werden die Ergebnisse nach 48 Stunden dargestellt. Es ist ersichtlich,

1. daß von dem ersten Reiß bis zur Durchbiegung von ca. 1,4 mm das Arbeitsvermögen von SFBA 40 dem entsprechenden Wert vom SB überlegen ist. Danach, mit dem Ausziehen der Fasern in der Zugzone, sinkt das Arbeitsvermögen des Stahlfaserbetons ab. Dagegen verläuft das Arbeitsvermögen vom SB kontinuierlich.
2. ähnlich wie bei den Versuchen nach 18 Stunden (Bild 6) hat SFBA 40 wieder ein besseres Arbeitsvermögen als SFBA 60 gezeigt.

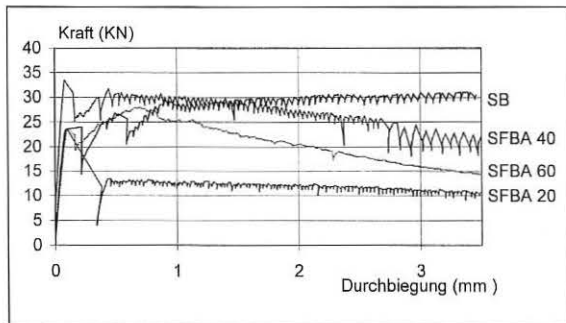


Bild 7: Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens für SFBA und SB nach 48 Stunden

Vor dem ersten Riß zeigt die mittig liegende Stabbe-
wehrung der Stahlbetonproben keine erkennbare
Auswirkung auf das Arbeitsvermögen (D_{BZ}^b) und die
Biegezugfestigkeit (β_{BZ}). So erreichen im Alter von
18 Stunden Stahlbetonproben vor dem Riß
schwächere Werte bezüglich D_{BZ}^b und β_{BZ} als Stahl-
faserbeton mit 20 kg/m³ A-Faser. Erst nach dem
Auftreten des ersten Risses weisen die mittig be-
wehrten Stahlbetonproben eine bessere Zähigkeit
und eine kleinere instabile Zone gegenüber Stahl-
faserbetonen mit 20 kg/m³ A-Faser nach dem Errei-
chen der Maximalkraft F auf. Stahlbeton zeigt ab
30 Stunden eine andere Form der Arbeitslinie, die
auf die steigende Verbundspannung zurückzuführen
ist [2].

4.3 Die äquivalenten Biegezugversuche an Null und Stahlfaserspritzbeton von Baustellenver- suchen

Nach zahlreichen und erfolgreichen Laborversuchen
über den Fasereinfluß auf die Betoneigenschaft im
jungen Alter war es notwendig, den Einfluß von un-
terschiedlichem Fasergehalt auf den Stahlfaserspritz-
beton im Tunnelvortrieb zu erforschen.

4.3.1 Trockenspritzverfahren im Tunnel

Die Stahlfasern wurden wie folgt in die Mischung für
die Druckfestigkeits-, E-Modulprüfung, die Prüfung
des Verformungsverhaltens sowie für die äquivalen-
ten Biegezugversuche und Platten-Biege Versuche
dosiert und gespritzt:

1. Nullspritzbeton
2. SFSpB mit 60 kg/m³ (=0,63 Vol.%, 2,4 Gew.%)
A-Faser: ZP 30/,50
3. SFSpB mit 90 kg/m³ (=0,945 Vol.%, 3,6
Gew.%) A-Faser: ZP 30/,50

Die Stahlfasern zeigen im Biegeversuch bei den
Baustellenspritzbetonen nach dem ersten Riß einen
viel stärkeren und positiveren Einfluß auf die Balken.

Der Unterschied zwischen Nullspritzbeton (NSpB)
und Stahlfaserspritzbeton (SFSpBA) ist deutlich er-
kennbar. Das Bild 8 zeigt die Gegenüberstellung
des Arbeitsvermögens von Nullspritzbeton und
Stahlfaser-Spritzbeton im Alter von 18 Stunden:

- Die Nullspritzbetonproben haben sehr spröde Ei-
genschaften gezeigt (Bild 8). Nach dem ersten
Auftreten eines Risses haben die Proben versagt und
waren nicht mehr weiter beanspruchbar.
- Die Stahlfaserspritzbetonproben mit 60 kg/m³ A-
Faser (SFSpBA 60) haben eine deutlich höhere
Zähigkeit und ein stark zugenommenes Arbeitsver-
mögen gegenüber dem NSpB nach dem Auftreten
des ersten Risses gezeigt (Bild 8), obwohl die Ver-
bundwirkung zwischen Stahlfaser und der Beton-
matrix im jungen Alter noch nicht so stark war.
- Die Stahlfaserspritzbetonproben mit 90 kg/m³ A-
Faser (SFSpBA 90) haben ein noch besseres Post-
crack-Verhalten gezeigt (Bild 8). Die instabilen
Bereiche nach dem Auftreten des ersten Risses sind
gegenüber den Proben mit 60 kg/m³ A-Faser viel
kleiner.

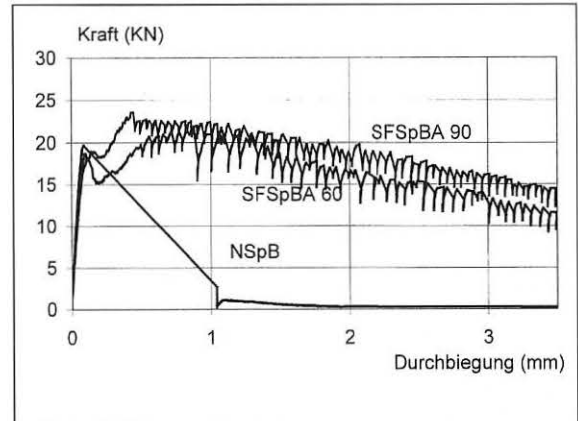


Bild 8: Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens für SFSpB mit A-Fasern und NSpB nach 18 Stunden beim Trockenspritzverfahren

4.3.2 Naßspritzverfahren im Tunnel

Für Naßspritzverfahren wurden zwei andere Stahl-
fasern

1. Stahlfaser Typ B ($l = 35$ mm, $d = 0,55$ mm,
 $l/d = 63,5$), Endhaken - geklebt, Oberfläche
glatt - rund
2. Stahlfaser Typ C ($l = 30$ mm, $d = 0,5$ mm, l/d
 $= 60$) Endhaken - lose, Oberfläche glatt - rund

mit der gleichen Faserdosierung (40 kg/m^3) für die Spritzbetonproben eingesetzt.

Das Bild 9 zeigt die Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens zwischen Stahlfaserspritzbeton mit 40 kg/m^3 B und C-Fasern.

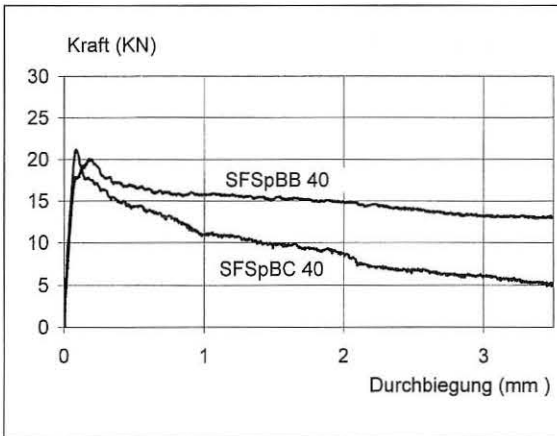


Bild 9: Gegenüberstellung des Arbeitsvermögens für SFSpB mit 40 kg/m^3 B-Fasern und C-Fasern nach 7 Tagen beim Naßspritzverfahren

Es ist ersichtlich, daß Stahlfaserspritzbeton mit 40 kg/m^3 B-Fasern ein besseres Arbeitsvermögen gegenüber C-Fasern gezeigt hat, ein recht beträchtlichen Einfluß von der Fasertypen besteht.

4.4 Faserverlust im Rückprall beim Trocken- und Naßspritzverfahren

Nach der Biegezugprüfung wurden insgesamt je 12 Proben mit der Abmessung von $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ aus den Balkenproben, die mit $60, 90 \text{ kg/m}^3$ A-Faser trockengespritzt und mit 40 kg/m^3 B, C-Faser naßgespritzt waren, herausgeschnitten und zermahlen, um den tatsächlichen Stahlfasergehalt nach EFNARC, der nach dem Spritzen in den Proben geblieben ist, zu ermitteln.

Die Ermittlungen haben gezeigt:

- Bei der Dosierung von 60 kg/m^3 A-Faser mit dem Trockenspritzverfahren enthalten die Proben ca. 34 kg/m^3 Stahlfasern, das bedeutet, daß ungefähr 43 % (26 kg/m^3) Stahlfasern im Rückprall geblieben sind.
- Bei der Dosierung von 90 kg/m^3 A-Faser mit dem Trockenspritzverfahren enthalten die Proben ca. 65 kg/m^3 Stahlfasern, das heißt, daß ungefähr 28 % (25 kg/m^3) Stahlfasern im Rückprall geblieben sind.

Bei der Dosierung von 40 kg/m^3 B-Faser mit dem Naßspritzverfahren enthalten die Proben ca. $33,45 \text{ kg/m}^3$ Stahlfasern, das bedeutet, daß ungefähr 16,38 % ($6,55 \text{ kg/m}^3$) Stahlfasern im Rückprall geblieben sind.

Bei der Dosierung von 40 kg/m^3 C-Faser mit dem Naßspritzverfahren enthalten die Proben ca. $31,79 \text{ kg/m}^3$ Stahlfasern, das heißt, daß ungefähr 20,53 % ($8,21 \text{ kg/m}^3$) Stahlfasern im Rückprall geblieben sind.

Der durchschnittliche Faserverlust infolge des Rückpralles von Trocken- und Naßspritzbeton ist in Tabelle 2 aufgelistet. Es ist zu sehen, daß der Faserverlust beim Trockenspritzverfahren fast doppelt so hoch ist wie beim Naßspritzverfahren.

Spritzverfahren	Faserverlust (%)
Trockenspritzverfahren	35,56
Naßspritzverfahren	18,45

Tab. 2: Gegenüberstellung des durchschnittlichen Stahlfaserverlustes im Trocken- und Naßspritzverfahren

5. Einfluß der Fasern in den Platten-Biege-Versuchen

Dieser Versuch wurde entwickelt, um das Maß der Zähigkeit und das Arbeitsvermögen von Faserspritzbeton zu untersuchen. Der Unterschied zwischen Platten und Balken ist:

- Der Balken ist ein statisch bestimmtes System und wird nur in Längsrichtung durch Biegung beansprucht.
- Die vierseitig auf unnachgiebigen Unterlage frei drehbar gelagerte Platte ist ein statisch unbestimmtes System und wird in zwei Richtungen (x und y) durch Biegung beansprucht. Ein statisch unbestimmtes System erlaubt nach dem 1. Riß eine zusätzliche Spannungumlagerung.

Im Vergleich zum Biegebalken kann eine Platte die Belastung im Tunnel unter Umständen besser simulieren, da in der Praxis keine statisch bestimmten Systeme auftreten.

5.1 Durchführung des Versuches

Die Prüfung erfolgte an gespritzten Platten (Bild 10). Die Deformation in der Plattenmitte ist mit einer Geschwindigkeit von $1,5 \text{ mm/min}$ bis zu einer Durchbiegung von 25 mm graphisch aufzunehmen.

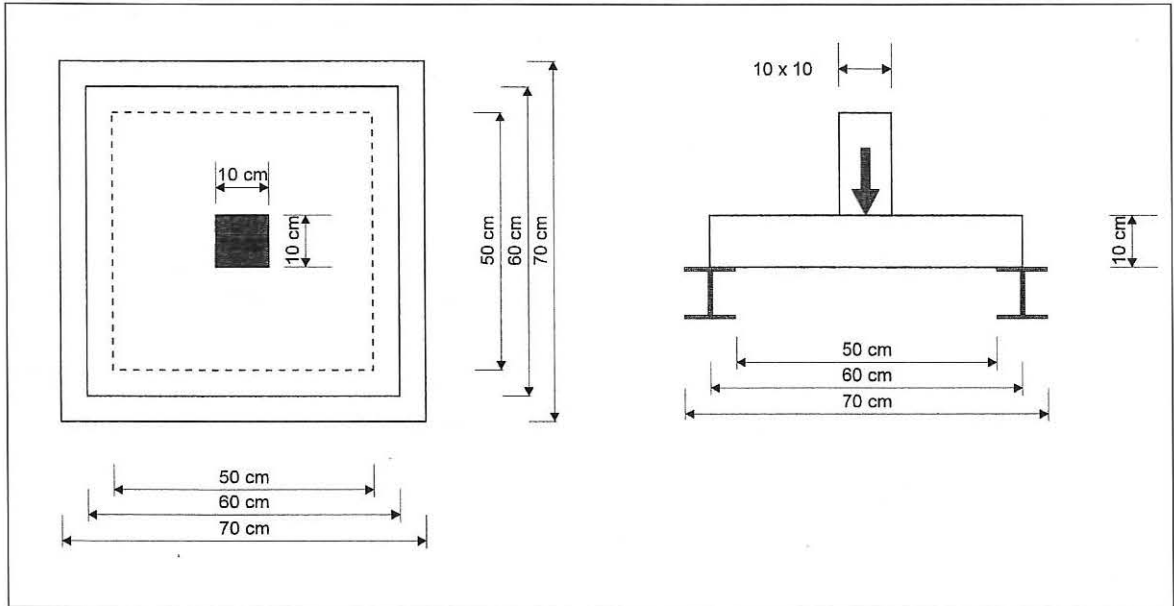


Bild 10: Abmessungen der Plattenprobe und Versuchsaufbau

5.2 Auswertung nach EFNARC

Als Beurteilungskriterium beim Platten-Biege-Versuch wird die "Energieaufnahme" in Tabelle 3 aus EFNARC [3] angegeben. Sie wird allerdings nur aus der Fläche unter der Last-Verformungskurve berechnet.

Zähigkeitsklasse	Energieaufnahmeäquivalent in Joule bis zur Verformung von 25 mm
a	500
b	700
c	1000

Tab. 3: Zähigkeitsklasse nach Energieaufnahmeäquivalent

5.2.1 Die Platten - Biege - Versuche von Stahlfaserbetonproben im Labor

Die Bilder 11 und 12 zeigen die Gegenüberstellung der Mittelwerte der Platten-Biege-Versuche von Stahlfaserbeton mit unterschiedlichem Fasergehalt und zentrisch bewehrten Stahlbetonproben. Der Bewehrungsgrad der Stahlbetonplattenproben liegt bei ca. 0,19 %. Das entspricht der Mindestbewehrung. Der Stahlgehalt für die CQS 6 Mattenbewehrung für je eine Platte beträgt ca. 0,714 kg. Das ist ungefähr gleich dem Fasergehalt einer Platte mit 20 kg/m³ A-Fasern. Aber die Energieaufnahmekapazität von Stahlbeton ist niedriger als jener von SFBA 20 (Bild 11).

Es ist zu ersehen:

1. Die Kurven von SFBA 20, 40 und 60 verlaufen nach 10 Stunden ähnlich.

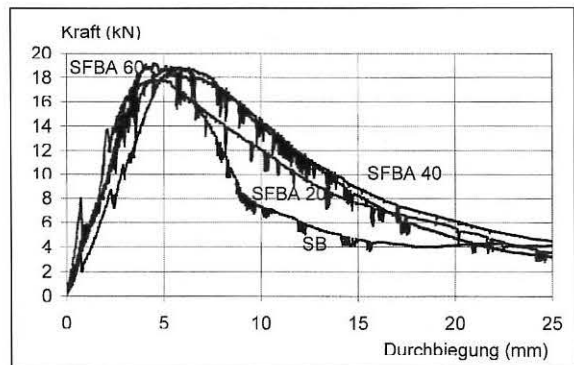


Bild 11: Gegenüberstellung der Kraft-Weg Diagramme des Platten-Biege-Versuches für SFBA und SB nach 10 Stunden

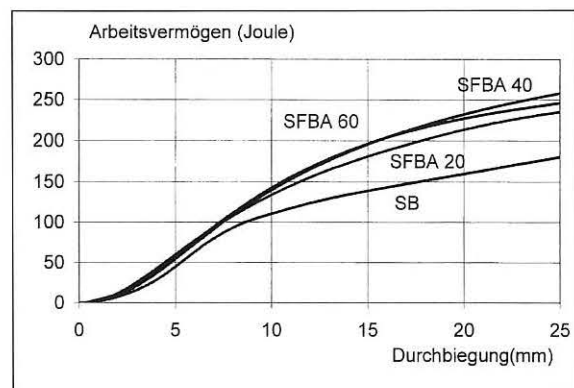


Bild 12: Gegenüberstellung des "Arbeitsvermögens" für SFBA und SB nach 10 Stunden

2. Im Vergleich zu Bild 5 ist der Unterschied zwischen SFBA 20 und SFBA 40 und 60 nicht so deutlich. Die Ursache könnte darauf zurückzuführen sein.

führen sein, daß sich die in zwei Richtungen beanspruchten Platten auch mit niedrigem Fasergehalt (20 kg/m^3) besser und zäher als die hauptsächlich in einer Richtung beanspruchten Balken verhalten können.

3. Der durch Biegezug versagende Faserbeton mit 20 kg/m^3 A-Faser kann mehr Energie im Alter von 10 Stunden als der durch Durchstanzen versagende zentrisch bewehrte Stahlbeton mit dem gleichen Stahlgehalt aufnehmen.
4. Ganz anders als im *Bild 5* ist der Unterschied zwischen SFBA 40 und 60 im *Bild 11* und *12* kaum zu erkennen. In den meisten Fällen sind über fast den ganzen Durchbiegungsbereich die Werte von SFBA 40 den entsprechenden Werten von SFBA 60 überlegen.
5. Im Vergleich zu *Bild 5* verhalten sich die Platten nach dem 1. Riß deutlich stabiler als die Balken.

Das *Bild 13* zeigt die Biegezugseite einer Stahlbetonplatte nach dem Versuch (beim Erreichen einer Verformung in der Plattenmitte von 25 mm) im Alter

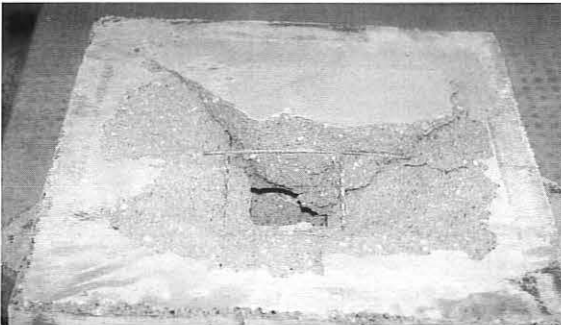


Bild 13: Stahlbetonprobe im Alter von 10 Stunden nach dem Platten-Biege-Versuch

von 10 Stunden. Der durchstanzgefährdete Versagensbereich ist deutlich zu sehen. Da die Probe baustellensimuliert mit der Mindeststahlbewehrung verstärkt wurde, ist natürlich keine Durchstanzbewehrung nach [4] vorhanden. Außerdem war der Beton nach 10 Stunden noch zu weich, um eine Verbund- und Schubaufnahmewirkung anzubieten.

Das *Bild 14* zeigt die Rißbildung der Biegezugseite einer Stahlbetonprobe mit 40 kg/m^3 A-Faser im Alter von 30 Stunden nach dem Versuch. Es ist zu ersehen, daß der Faserbetonproben durch Biegezug versagt haben.

Für Faserspritzbeton- und Faserbetonproben sind die Fasern nahezu zweidimensional oder dreidimensional gleichmäßig über die Plattenhöhe verteilt.

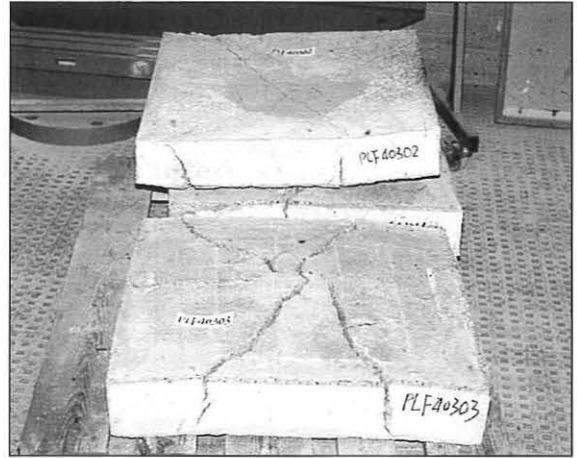


Bild 14: Plattenprobe von SFBA 40 im Alter von 30 Stunden nach dem Platten-Biege-Versuch

- Die gleichmäßig über die Querschnittshöhe verteilten und zwei-, oder dreidimensional in den Platten orientierten Fasern haben zum Teil wie eine Durchstanzbewehrung funktioniert, oder die Schubspannung infolge Durchstanzen teilweise aufgenommen [4], [5] und [6].
- Wegen der gleichmäßig verteilten Fasern sind die Spannungen in den faserbewehrten Platten - besonders im durchstanzgefährdeten Bereich des Stahlbetons - gleichmäßiger als die im Stahlbeton verteilt. Damit erhöht sich auch der Durchstanzwiderstand.
- Die gleichmäßig in den Platten verteilten Fasern führen zu einer besseren Spannungsumlagerung und einer kompletten Durchbiegungsverformung in zwei Richtungen der ganzen Platten. Daher ist die Energieaufnahmekapazität des Stahlbetons größer als die des entsprechenden Stahlbetons. Und die instabilen Bereiche nach dem 1. Riß konnten auch verringert werden.

Diese Versuchsergebnisse erlauben die Bedenken über die mögliche Anwendung von Fasern nicht nur im Tunnelbau, wo hauptsächlich Druckbeanspruchungen auftreten, sondern auch im Durchstanzbereich zu verringern.

5.2.2 Die Platten - Biege - Versuche von Stahlbeton auf der Baustelle

Die *Bilder 15* und *16* zeigen die Gegenüberstellung der Mittelwerte der Platten-Biege-Versuche von Stahlbeton mit 60 kg/m^3 A-Fasern und Nullspritzbeton.

Es ist ersichtlich, daß beim Nullspritzbeton die Kraft

nach dem ersten Riß zwar rasant abfällt, danach aber ein zweites Kraftmaximum erreicht wird (Bild 15).

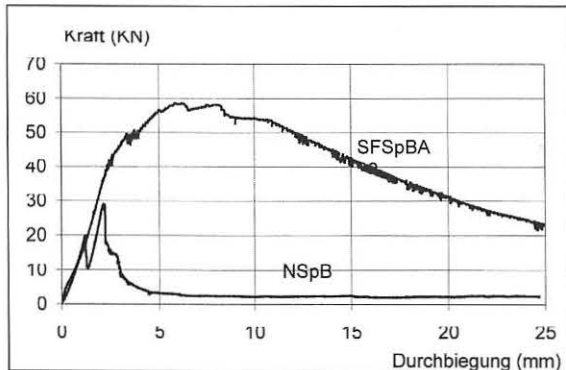


Bild 15: Gegenüberstellung der Kraft-Weg Diagramme des Platten-Biege Versuches von NSpB und SFSpBA 60 nach 18 Stunden

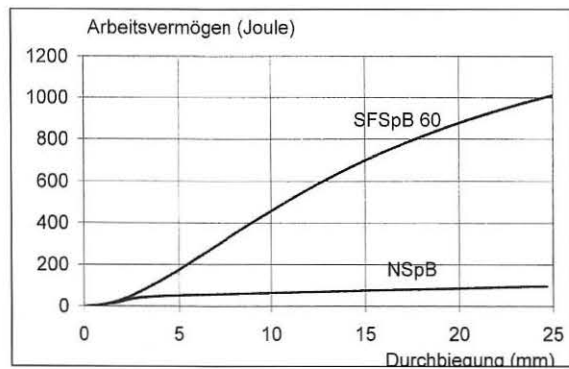


Bild 16: Gegenüberstellung des "Arbeitsvermögen" von NSpB und SFSpBA 60 nach 18 Stunden

Es kann angenommen werden, daß ein Riß zuerst nur in einer Richtung (x) durch die Belastung verursacht wird, dem eine Spannungumlagerung in die andere Richtung (y) folgt. Wenn die Risse in beiden Richtungen erscheinen, kollabiert die Platte endgültig.

Im Vergleich zu Nullspritzbetonproben haben die Proben SFSpBA 60 (34 kg/m³ in der Probe) eine viel bessere Zähigkeit und Energieaufnahmekapazität gezeigt.

Gegenüber dem Biegezugversuch (Bild 5, 6 und 7) ist der Fasereinfluß beim 1. Riß auf das Tragverhalten in dem statischen unbestimmten System deutlich zu erkennen.

Die Kraft ist tendenziell bis zur maximalen Last angestiegen. Die instabile Zone nach dem 1. Riß ist viel kleiner als beim Balkenversuch.

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen stellen einen neuen Schritt zur realistischen Einschätzung der Eigenschaften des Stahlfaserbetons bzw. Stahlfaserspritzbetons im jungen Alter dar.

Im jungen Alter (bis 18 Stunden) wird der elastische Bereich des Betons bis zum ersten Riß mit steigendem Fasergehalt für das gleiche Betonalter angehoben.

Nach dem ersten Riß im Balkenversuch zeigt Stahlfaserbeton mit 20 kg/m³ A-Fasern wenig Effekt auf die äquivalente Biegezugfestigkeit und auf das Arbeitsvermögen und eine sehr große instabile Zone. Im Tunnelbau ist dieser Fasergehalt von 20 kg/m³ Fasern nicht geeignet, jedoch kann er für andere Zwecke, z. B. für Industrieböden, eingesetzt werden. Es besteht kein deutlicher Unterschied des Arbeitsvermögens zwischen Stahlfaserbeton mit 40 und 60 kg/m³ Fasern. Stahlfaserbeton mit 60 kg/m³ A-Fasern zeigt jedoch im jungen Alter nach dem Erreichen der höchsten Last eine kleinere instabile Zone als Stahlfaserbeton mit 40 kg/m³, obwohl das Arbeitsvermögen von Stahlfaserbeton mit 40 kg/m³ den entsprechenden Werten von Stahlfaserbeton mit 60 kg/m³ über den ganzen Durchbiegungsbereich zu verschiedenen Zeiten überlegen ist.

Die statisch unbestimmten Systeme wie Platte erhalten durch die Wirkung der Stahlfasern zusätzliche Möglichkeiten der Spannungumlagerung. Die Versuche an Rechteckplatten mit zentrischer Einzellast nach EFNARC haben gezeigt, wie sich das zweite statische System sowohl mit als auch ohne Fasern beim Auftreten des ersten Risses einstellt.

Die Versagensform zwischen Stahlfaserbeton- und Stahlbetonproben im Platten-Biege-Versuch ist ganz unterschiedlich. Die Stahlfaserbetonproben haben durch Biegezug versagt, die zentrisch bewehrten Stahlbetonproben haben infolge Durchstanzen versagt. Die Versuche mit Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton zeigen, daß die gleichmäßig in der Platte orientierten und über die Querschnittshöhe verteilten Fasern zum Teil wie eine Durchstanzbewehrung wirken und die Schubspannungen teilweise aufnehmen können. Dies erlaubt auch Überlegungen über eine mögliche Anwendung der Fasern in anderen Durchstanzbereichen.

Im Vergleich zum Biegezugversuch für Balken werden die instabilen Bereiche der Platten nach dem ersten Riß deutlich kleiner, besonders wenn der Fasergehalt höher als 20 kg/m³ ist. Der durch Biege-

zug versagende Stahlfaserbeton mit 20 kg/m^3 nimmt mehr Energie im Alter von 10 Stunden als der durch Durchstanzen versagende Stahlbeton auf, obwohl der Stahlgehalt für die zwei unterschiedlichen Prüfkörper gleich ist.

Ähnlich wie beim Balkenversuch wird kein deutlicher Unterschied im Arbeitsvermögen zwischen Stahlfaserbeton mit 40 und 60 kg/m^3 Fasern in den Platten-Biege-Versuchen beobachtet. Im Alter von 30 Stunden erreicht Stahlfaserbeton mit 40 und 60 kg/m^3 bei der Durchbiegung von 25 mm ein max. Arbeitsvermögen von 1440 und 1410 Joule [2].

Die Versuchsergebnisse des statisch unbestimmten Platten-Biege-Versuchs lassen feststellen, daß der Stahlfaserbeton mit 60 kg/m^3 im jungen Alter (von 10 bis 48 Stunden) den Stahlbeton mit Mindestbewehrung in nicht genauer Lage ersetzen kann. Der Stahlgehalt dieser Proben ist jedoch nahezu 3-fach so hoch wie jener von Stahlbeton mit Mindestbewehrung.

Ähnlich wie bei den äquivalenten Biegezugversuchen liegen die Arbeitsvermögen des Stahlfaser-spritzbetons bei den Platten-Biege-Versuchen deutlich höher als bei Spritzbeton ohne Fasern.

Die Versuche zeigen

1. eine mögliche effektive und wirtschaftliche Dosierung der Fasern $30/50$ zwischen 20 und 60 kg/m^3 Fasern für Stahlfaserbeton - nämlich 40 kg/m^3 - für jene Fälle, wo die instabile Zone gerade nach der höchsten Last keine große Rolle in der Sicherheit spielt.
2. Faserspritzbeton kann Spritzbeton mit konventioneller Mattenbewehrung nur bei bestimmten Einsatzzwecken ersetzen und in bestimmten Fällen eine Alternative zu mattenbewehrtem Beton sein. Nur dann, wenn aus statischen Gründen ein Mindestbewehrungsgehalt oder nur eine konstruktive Bewehrung erforderlich und die Bewehrungsposition nicht genau sinnvoll fixierbar ist, wird der Einsatz von Stahlfaserbeton mit dem Fasergehalt von 60 kg/m^3 effektiver.

Weiterführende Untersuchungen sollten sich mit Versuchen

1. zu Kriechverformungen des Faserbetons (ab dem jungen Alter über einen langen Zeitraum) und deren Auswertung,
2. zu Platten-Biege-Versuchen mit höherem Fasergehalt,
3. zur instabilen Zone nach dem Erreichen der maximalen Last,
4. zum Bemessungssystem,
5. zur Kombination zwischen Stahlbewehrung und Stahlfasern, sowie Stahlfasern und anderen Fasern

mit Naß- oder Trockenspritzbeton bei einer langen Dauer des Spritzvorgangs im Vergleich zum Stahlbeton mit Mindestbewehrung beschäftigen.

7. Literatur

- [1] **Deutscher Betonverein (Herausgeber):**
Bemessungsgrundlage für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. DBV-Merkblatt.
- [2] **Ding, Y.N.:**
Technologische Eigenschaften von jungem Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton. Dissertation, 1998.
- [3] **Europäische Verband der Hersteller und Anwender von Spezialprodukten im Bauwesen (Herausgeber):**
European Specification for Sprayed concrete. EFNARC, 1996.
- [4] **Normenausschuß Bauwesen (NABau):**
DIN 1045. Beton und Stahlbeton. 1988.
- [5] **Ahmad, S.H.:**
Punching Shear Tests of Slabs Reinforced with 3 - D Carbon Fibre Fabric. Concrete International, June 1994.
- [6] **Furche, J.:**
Elementdecken im Durchstanzbereich von Flachdecken. Betonwerk+Fertigteile - Technik 6, 1996.
- [7] **Maidl, B.:**
Stahlfaserbeton. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1991.