

---

# Duktilität von stahlmatten- und faserbewehrten Spritzbetonen

---

## SYSTEM DUCTILITY OF MESH AND FIBRE REINFORCED SHOTCRETE

**ROLAND HEERE, DUDLEY R. MORGAN, NEIL McASKILL, CESAR CHAN**

Die Verfasser haben eine Untersuchung über den Einfluß der Bewehrungsart auf die Duktilität von Spritzbeton durchgeführt. Die untersuchten Spritzbetone hatten ähnliche Rezepturen und unterschieden sich lediglich in ihrer Bewehrung. Die Dosierung von Stahlfasern reichte von 40 bis 60 kg/m<sup>3</sup>, Kunststoffasern wurden zwischen 0,5 und 1,5 Vol.% beigegeben. Stahlmattenbewehrte Spritzbetone dienten dem Vergleich. Insgesamt umfaßte die Untersuchung neun Faser- und zwei Mattentypen, sowie Naß- und Trockenspritzbeton. Die folgenden Testverfahren dienten der Ermittlung von Duktilitätskennwerten: ASTM C1018 Biegebalken (10 cm x 10 cm x 35 cm), Australischer Plattentest (statisch bestimmt gelagerte runde Platte, 80 cm Durchmesser, 8 cm Dicke, zentrale Einzellast), Südafrikanischer Plattentest (statisch unbestimmt gelagerte Platte, 160 x 160 x 8 cm, gleichförmige Flächenlast auf 100 cm x 100 cm Fläche in Plattenmitte). Die Testergebnisse zeigen, daß verschiedene Stahl- und Kunststoffaserbewehrungen geläufigen nordamerikanischen Mattenbewehrungen ebenbürtig oder sogar überlegen sind.

*The authors have conducted a comprehensive study to compare the system ductility of various shotcretes. The shotcretes investigated had similar base mix proportions, but were reinforced with either welded wire mesh, or fibres. Fibre contents varied from 40 to 60 kg/m<sup>3</sup> for steel fibres and 0.5 % to 1.5 % by vol. for synthetic fibres. Nine types of fibres and two types of mesh were tested in wet-, and dry-mix shotcretes. Tests methods involved the standard ASTM C 1018 toughness test on 10 x 10 x 35 cm beams, the Australian Round Panel Tests (mid-point loading of a statically determinately supported round panel 80 cm diameter, 8 cm deep), and the South African Panel Test (uniform loading with a water bed on a 1.0 m x 1.0 m area of a statically indeterminately supported 1.6 m x 1.6 m, 8 cm deep shotcrete panel). The test results demonstrate that some fibre reinforced shotcretes can provide equivalent or superior system ductility (residual load carrying capacity after cracking) compared to conventional mesh reinforced shotcretes.*

### 1. Einleitung

Zum Ausbau und zur Sicherung von Hängen, Tunneln oder Bergwerksstollen findet Spritzbeton

schon seit Jahrzehnten Anwendung. Bis in die 70er Jahre hinein wurde solcher Spritzbeton vorrangig mit Drahtmatten bewehrt. Seither wurden Stahlfasern erfolgreich eingesetzt, um das Arbeitsvermögen von

Spritzbeton zu verbessern und um Rißweiten zu beschränken. Seit den 90er Jahren finden vermehrt Kunststoffasern Einzug in die nordamerikanische Spritzbetontechnologie. Für Planer, Ingenieure und Anwender erhebt sich daher immer häufiger die Frage, welche Bewehrungsart für welchen Bewehrungszweck angemessen ist. Die vorliegende Studie sollte Unterschiede zwischen verschiedenen handelsüblichen Bewehrungen finden und damit bei der Auswahl geeigneter Materialien behilflich sein.

2. Spritzbeton

2.1 Gemischzusammensetzung

Die Studie sollte dazu beitragen, den Einfluß verschiedener Bewehrungsarten auf die physikalischen Eigenschaften von Spritzbeton zu bestimmen. Um ein Minimum an Variablen zu erzielen, wurde nur eine einzige Mixrezeptur entworfen, auf der sämtliche Spritzbetone basierten. Diesem Grundgemisch wurden lediglich Luftporenbildner, Betonverflüssiger und Fließmittel beigemischt, wenn es im Naßspritzverfahren eingesetzt wurde.

Tabelle 1a zeigt die detaillierte Mischungszusammensetzung für Naßspritzbeton und Tabelle 1b für Trockenspritzbeton. Das Grundgemisch besteht aus Portlandzement, Microsilika, Flugasche und Spritzbetonzuschlag mit 10 mm Größtkorn.

Material	Masse kg	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Volumen m <sup>3</sup>
Portlandzement	400	3150	0,1270
Microsilika	45	2200	0,0205
Flugasche	30	2200	0,0136
Grobzuschlag [ 2.5 - 10 mm]	450	2705	0,1664
Sand	1210	2655	0,4557
Wasser	180	1000	0,1800
Betonverflüssiger [Liter]	1,20	1000	0,0012
Fließmittel [Liter] *	2,00	1000	0,0020
Luftporenbildner dosiert für ein Luftporenvolumen von:			
(vor dem Spritzen)	7-10%		
(In-situ)	3,5%		0,0350
Summe	2318,2		1,0014

\* Dosierung wie erforderlich, um vorgesehene Konsistenz zu erreichen

Tab. 1a: Mischungszusammensetzung des Naßspritzbetons

Die in dieser Studie verwendeten Stahlfasertypen (F1 bis F3) haben 1100 N/mm<sup>2</sup> Mindestzugfestigkeit. Die Kunststoffasern S1 und S2 sind diskrete Kopolymerfasern, Faser S3 ist eine diskrete Polypropylenfaser und Faser S4 eine fibrillierte Polypropylenfaser. Die beiden Stahlmatten bestehen aus geschweißtem Baustahl. Die Bilder 1a bis 1c zeigen die Geometrien der verwendeten Bewehrungen.

Material	Trockermasse kg/m <sup>3</sup>	Feuchte-Korrektur kg	Masse kg/m <sup>3</sup>
Portlandzement	400	0	400
Microsilika	45	0	45
Flugasche	30	0	30
Grobzuschlag [10-2.5 mm]	446	+4	450
Sand	1193	+17	1210
Wasser *	0	-21	180
Summe	2114		2315

Wassersättigung, Grobzuschlag = 0,89%  
 Wassersättigung, Sand = 1,41%  
 \* Schätzung

Tab. 1b: Mischungszusammensetzung des Trockenspritzbetons

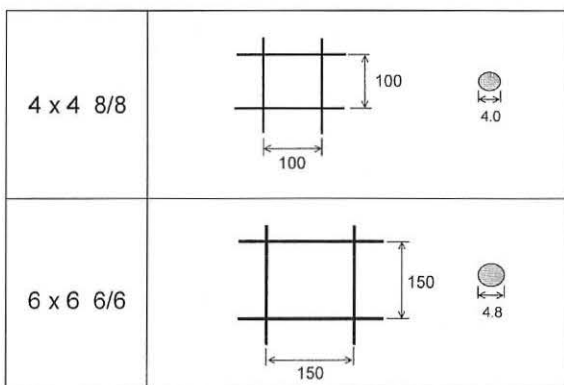


Bild 1a: Dimensionen der Stahlmatten (mm)

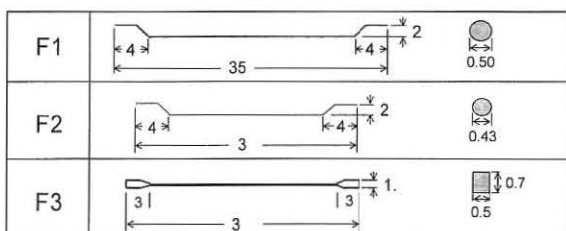


Bild 1b: Dimensionen der Stahlfasern (mm)

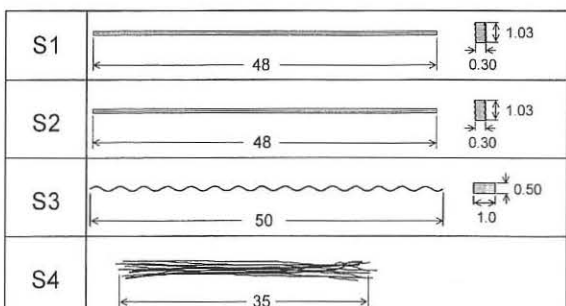


Bild 1c: Dimensionen der Kunstfasern (mm)

## 2.2 Herstellung

Um vergleichbare Prüfergebnisse zu erzielen, mußte über den gesamten Verlauf der Studie ein Spritzbetongrundgemisch von konstanter Güte verwendet werden. Ein ortsansässiges Trockenmörtelwerk war in der Lage, diese Anforderung zu erfüllen, indem staubtrockene Ausgangsstoffe von verlässlicher Qualität in einem Zwangsmischer gemischt wurden. Das trockene Mischgut wurde anschließend in 30-kg-Papiertüten abgefüllt und bis zum Zeitpunkt der Verarbeitung witterungsgeschützt gelagert.

Zur eigentlichen Spritzbetonaufbereitung im Versuchsfeld kam eine modifizierte Allentown-Spritzbetonmaschine zur Anwendung, wenn im Naßspritzverfahren gearbeitet wurde. Der integrierte Zwangsmischer dieser Spritzbetonmaschine faßte ca. 500 kg Gemisch einschließlich Anmachwasser. Zusatzmittel und Fasern wurden dem Gemisch manuell beigegeben und mindestens 5 Minuten durchmischt. Anschließend wurde das Gemisch mittels

der eingebauten Kolbenpumpe durch ca. 30 m Förderleitung mit 50 mm Innendurchmesser, ein Reduzierstück und weitere ca. 15 m Leitung mit nunmehr 38 mm Innendurchmesser zur Spritzdüse gepumpt.

Im Trockenspritzverfahren wurde das Gemisch von einer Rotormaschine durch eine 50 m lange Förderleitung (50 mm Innendurchmesser) zur Spritzdüse geblasen, wo das Anmachwasser eingespritzt wurde. Stahlfasern, wo gefordert, waren dem Spritzbeton bereits im Trockenmörtelwerk beigegeben worden.

Für jedes zu prüfende Gemisch wurden folgende Prüfkörper gespritzt:

- 1 ACI-506-Testplatte (60 x 60 x 12 cm)
- 1 Australische Testplatte (Durchmesser 80 cm, 8 cm dick)
- 1 Südafrikanische Testplatte (160 x 160 x 8 cm)
- 1 "Bienenstock" (konischer Spritzbetonkörper mit annähernd 60 cm Durchmesser, ca. 10 cm dick) zur Rückprallermittlung.

Bezeichnung	Bewehrung	Fasergehalt	
		Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>
<b>NASSPRITZBETON</b>			
unbewehrt	Standard, unbewehrt	-	-
Matte 4 x 4 8/8	eine Mattenlage in Plattenmitte	-	-
Matte 6 x 6 6/6	eine Mattenlage in Plattenmitte	-	-
Stahlfaser			
F1	35 mm x 0.5 mm Faser mit doppelt gebogenen Enden	0,51	40
F3	30 mm x 0.5 mm x 0.7 mm Faser mit gequetschten Enden	0,51	40
F3	30 mm x 0.5 mm x 0.7 mm Faser mit gequetschten Enden	0,76	60
Kunstfaser			
S1	48 mm x 0.30 x 1.03 mm leicht fibrillierende Faser	1,0	9,3
S1	48 mm x 0.30 x 1.03 mm leicht fibrillierende Faser	1,5	14,0
S2	48 mm x 0.30 x 1.03 mm leicht fibrillierende Faser*	1,0	9,3
S3	50 mm x 0.5 x 1.0 mm deformierte diskrete Faser	0,5	4,6
S3	50 mm x 0.5 x 1.0 mm deformierte diskrete Faser	1,0	9,1
S4	35 mm fibrillierende Faser	0,55	5,0
<b>TROCKENSPRITZBETON</b>			
unbewehrt	Standard, unbewehrt	-	-
Matte 4 x 4 8/8	eine Mattenlage in Plattenmitte	-	-
Matte 6 x 6 6/6	eine Mattenlage in Plattenmitte	-	-
Stahlfaser			
F2	30 mm x 0.43 mm Faser mit doppelt gebogenen Enden	0,64	50
F3	30 mm x 0.5 mm x 0.7 mm Faser mit gequetschten Enden	0,76	60

Tab. 1c: Beschreibung der verwendeten Mischungen (\*modifiziert)

Die Tabellen 1a und 1b zeigen die Zusammensetzung des Grundgemisches für Naß- bzw. Trockenspritzbeton. Tabelle 1c gewährt einen Überblick über ausgewählte Spritzbetone, die in dieser Studie untersucht wurden.

### 3. Prüfverfahren und Ergebnisse

#### 3.1 Frischbetoneigenschaften

Im Naßspritzverfahren verarbeitete Betone wurden auf Konsistenz und Luftporengehalt überprüft. Die Konsistenz wurde gemäß ASTM C143 gemessen. Zu diesem Zweck wird Beton in eine Kreiskegelstumpfform aus Stahlblech (30 cm hoch, 20 cm bzw. 10 cm Durchmesser der unteren bzw. oberen Öffnung) gefüllt. Nach dem Verdichten wird die Form vorsichtig nach oben hin abgezogen, woraufhin das Setzmaß (Slump) des nun freistehenden Betonkegels gemessen wird. Während die untersuchten Spritzbetone vor dem Pumpen eine plastische Konsistenz von im Mittel ca. 6 cm aufwiesen, wurde - wie erwartet - nach dem Spritzen ein erhebliches Ansteifen der Gemische auf ca. 1 cm Setzmaß festgestellt.

Der Luftporengehalt von Frischbeton wurde gemäß ASTM C231 ermittelt. Nach diesem Verfahren wird ein Stahltopf mit 7 Litern Fassungsvermögen vollständig mit Frischbeton gefüllt und mit einem Stahldeckel druckdicht verschlossen. Anschließend wird der Behälterinhalt mit Luft von definiertem Volumen und Überdruck aus einer im Deckel eingebauten Vorratskammer beaufschlagt. Der daraus folgende, auf einem geeichten Manometer ablesbare

Druckabfall in der Vorratskammer ist proportional zum (komprimierbaren) Luftporenvolumen im Frischbeton. Im Zuge der Studie wurde der Luftporengehalt von Naßspritzbeton vor und nach dem Spritzen, und von Trockenspritzbeton nach dem Spritzen bestimmt.

Der Luftporengehalt von Naßspritzbeton vor dem Pumpen lag im allgemeinen bei ca. 10 %, was die Pumpbarkeit günstig beeinflusste. Beim Aufprall auf den Untergrund nach dem Spritzen verlor der Beton einen Großteil des Luftporenvolumens, das sich im Mittel auf etwa 2,5 % verringerte und ein willkommenes Ansteifen der Mischung verursachte.

Tabellen 2a und 2b fassen die Untersuchungsergebnisse des Frischbetons zusammen.

#### 3.2 Rückprall

Rückpralluntersuchungen wurden in einer Rückprallkammer aus beschichtetem Sperrholz durchgeführt. Dabei wurde der Spritzbeton auf eine im Durchmesser ca. 60 cm große, durch 4 Nägel markierte Fläche an der Kammerrückwand im Mittel ca. 10 cm dick aufgetragen. Das Material, das während des Spritzens zu Boden fiel, wurde als Rückprall ( $M_R$ ) definiert und gewogen. Anschließend wurde das In-Situ-Material vom Untergrund gelöst und ebenfalls gewogen ( $M_I$ ). Im Falle von Faserspritzbeton wurden außerdem die Fasern aus dem Rückprall und dem In-Situ-Material ausgewaschen und gewogen ( $MF_R$  bzw.  $MF_I$ ). Aus den Wäageergebnissen und dem ursprünglichen Fasergehalt im

Gemisch	Fasergehalt		Temperatur		Slump cm	Luftporenvolumen	
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	Luft °C	Gemisch °C		frisch %	In-situ %
Standard / Matte	-	-	7	15	6	7,4	2,4
Stahlfaser							
F1	0,51	40	24	27	7	9,8	2,9
F3	0,51	40	21	23	3	7,8	2,9
F3	0,76	60	21	23	4	6,6	2,5
Kunstfaser							
S1	1,0	9,3	20	25	8	13	3,2
S1	1,5	14,0	20	n.v.	2	12	2,3
S2	1,0	9,3	12	n.v.	7	12	1,9
S3	0,5	4,6	12	20	6	7,6	3,0
S3	1,0	9,1	13	21	3	6,5	3,0
S4	0,55	5,0	6	25	3	4,6	2,2

n.v. = nicht verfügbar

Tab. 2a: Frischbetoneigenschaften - Naßspritzbeton

Gemisch	Fasergehalt		Temperatur		Luftporenvolumen In-situ %
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	Luft °C	Gemisch °C	
Standard / Matte	-	-	6	10	2,4
Stahlfaser					
F2	0,64	50	23	n.v.	3,1
F3	0,76	60	22	n.v.	3,0
F4	0,76	60	6	10	2,9
F5	0,76	60	6	10	3,1

n.v. = nicht verfügbar

Tab. 2b: Frischbetoneigenschaften - Trockenspritzbeton

Grundgemisch vor dem Pumpen ( $CF_G = \text{Fasermasse/Gesamtmasse des Gemisches} * 100\%$ ) wurden folgende Faktoren berechnet:

- Spritzbetonrückprall =  $C_R = M_R / (M_R + M_I) * 100\%$
- In-Situ-Fasergehalt =  $CF_I = M_{F_I} / M_I * 100\%$
- Fasergehalt im Rückprall =  $CF_R = M_{F_R} / M_R * 100\%$
- Faserretention =  $CF_I / CF_G * 100\%$

Eine Faserretention von über 100 % bedeutet beispielsweise, daß der eingebaute Spritzbeton eine höhere Faserkonzentration aufweist als das Bereitstellungsgemisch.

Der Spritzbetonrückprall im Naßspritzverfahren lag zwischen 7 % für unbewehrten Beton und 23 % für den mit den synthetischen Fasern S4 bewehrten Spritzbeton. Im Trockenspritzverfahren ergaben sich Rückprallwerte von 17 % für unbewehrten Beton und bis zu 27 % für den mit den Stahlfasern F3 bewehrten Spritzbeton. Detaillierte Ergebnisse sind in *Tabelle 3* zusammengestellt. Generell zeigten sich in dieser Studie folgende Trends: Der Rückprall ist im Naßspritzverfahren generell niedriger als im Trockenspritzverfahren, unbewehrter Spritzbeton hatte einen niedrigeren Rückprall als Faserspritzbeton, und synthetische Fasern hatten eine höhere Retention als Stahlfasern.

### 3.3 Untersuchungen an erhärtetem Spritzbeton

#### 3.3.1 Druckfestigkeit

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit wurden den ACI Testplatten im Alter von 5 Tagen Bohrkern mit ca. 75 mm Durchmesser entnommen, im Feuchtraum

Mischung	Spritzbeton- Rückprall	Faser- Retention
	Masse-%	%
NASSPRITZBETON		
Standard / Matte	7	-
Stahlfaser		
F1	21	57
F3	9	80
F3	11	75
Kunstfaser		
S1	16	82
S1	19	72
S2	20	92
S3	11	83
S3	12	82
S4	23	109
TROCKENSPRITZBETON		
Standard / Matte	17	-
Stahlfaser		
F2	22	66
F3	26	77

Tab. 3: Rückprall

bei 23 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und gemäß ASTM C42 im Alter von 7 und 28 Tagen geprüft. Die Druckfestigkeit lag zwischen 45 und 69 N/mm<sup>2</sup> für 7 Tage alten Spritzbeton und zwischen 56 und 87 N/mm<sup>2</sup> für 28 Tage alten Spritzbeton. Die relativ hohe Streuung der 7-Tage-Druckfestigkeit ist teilweise darauf zurückzuführen, daß alle Testplatten bis zum Alter von 5 Tagen im Freien gelagert wurden. Temperaturschwankungen (die Spritzbetonproduktion erstreckte sich von September 1998 bis Januar 1999) konnten daher deutliche Reifeunterschiede bei verschiedenen 7 Tage alten Spritzbetonen verursachen. Die relativ niedrige Festigkeit der Trockenspritzbetone verursachte die weite Streuung der 28-Tage-Druckfestigkeit. *Tabelle 4* faßt die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen zusammen.

Mischung	Fasergehalt		Druckfestigkeit	
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	7 Tage N/mm <sup>2</sup>	28 Tage N/mm <sup>2</sup>
NASSPRITZBETON				
Standard / Matte	-	-	44,0	72,5
Stahlfaser				
F1	0,51	40	57,5	65,5
F3	0,51	40	60,4	78,7
F3	0,76	60	69,0	87,2
Kunstfaser				
S1	1,0	9,3	56,3	72,0
S1	1,5	14,0	55,5	68,9
S2	1,0	9,3	44,5	71,5
S3	0,5	4,6	61,9	71,4
S3	1,0	9,1	59,2	66,1
S4	0,55	5,0	59,4	75,2
TROCKENSPRITZBETON				
Standard / Matte	-	-		55,7
Stahlfaser				
F2	0,64	50	46,8	66,2
F3	0,76	60	45,8	64,6

Tab. 4: Druckfestigkeit

### 3.3.2 Wasseraufnahmevermögen

Das Wasseraufnahmevermögen wurde gemäß ASTM C642 ermittelt. Dieses Prüfverfahren fordert, daß Probekörper bis zur Massekonstanz bei 105 °C trocknen, daraufhin abkühlen und anschließend bis zur Massekonstanz im Wasserbad bei etwa 21 °C lagern. Danach werden die Prüfkörper für 5 Stunden in kochendem Wasser gelagert und ihre Massen ermittelt. Schließlich werden die Gewichte der Probekörper unter Wasser bestimmt. Basierend auf diesen Meßergebnissen werden die Faktoren BA und VPV berechnet. Niedrige Faktoren bedeuten geringes Wasseraufnahmevermögen. In typischen Ausschreibungen für frostbeständigen Spritzbeton werden häufig maximal 8,0 % BA und maximal 17 % VPV gefordert [1].

In dieser Studie lagen die BA-Faktoren zwischen 2,7 % und 5,3 %, während die VPV-Faktoren zwischen 6,1 % und 11,8 % lagen. Diese Ergebnisse zeigen, daß die Spritzbetone trotz des in einigen Fällen hohen Fasergehaltes sehr hohe Güte erzielten.

### 3.3.3 Biegebalken

Die Biegezugfestigkeit und einige Duktilitätskennwerte wurden am Biegebalken (35 x 10 x 10 cm) gemäß ASTM C1018 im Alter von 28 Tagen ermittelt. Je drei Biegebalken wurden im Alter von 5 Tagen aus den ACI-Testplatten herausgesägt und bis zur Prüfung im Feuchtraum gelagert. Zur Prüfung werden die Balken bei einer Spannweite von 30 cm

in den Drittelpunkten belastet, während die Last-Verformungskurven bis 2 mm Mittendurchbiegung bestimmt werden. *Tabelle 5* gibt Auskunft über die erzielten Ergebnisse.

Mit Biegezugfestigkeiten von 6 bis 8 N/mm<sup>2</sup> waren die Spritzbetone von hoher Güte. Die Duktilitätsparameter und -bereiche (je höher, desto zäher, [2]) verdeutlichen die Unterschiede zwischen den Bewehrungsarten und -dosierungen. Während Stahlfasern dem Biegebalken gute Duktilität bei kleinen Mittendurchbiegungen (< 1 mm) verleihen, erscheinen hohe Dosierungen von einigen langen diskreten synthetischen Fasern als gleichwertig oder sogar überlegen, wenn die Mittendurchbiegungen auf deutlich über 1 mm ansteigen. *Bilder 2 bis 4* verdeutlichen diese Unterschiede anhand der durchschnittlichen Last-Verformungskurven. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte aus jeweils 3 individuellen Biegebalken.

### 3.3.4 Australischer Plattentest

Dieses Testverfahren wurde kürzlich von Bernard [3] als potentieller Ersatz für den EFNARC-Test [4] entwickelt. Für den Australischen Plattentest wird eine runde Spritzbetonplatte mit 80 cm Durchmesser und 8 cm Dicke gespritzt. Zur Prüfung wird die Platte in der Prüfmaschine statisch bestimmt auf drei horizontal beweglichen, gelenkigen Auflagern nahe dem Umfang positioniert. Diese Auflagern bilden die Eckpunkte eines gleichseitigen Dreiecks mit 65 cm Seitenlänge. Die Platte wird zentrisch belastet, um ein Last-Verformungsdiagramm aufzunehmen. Der

Mischung	Fasergehalt*		In-situ Fasergehalt Vol.-%	Biegezugfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Restspannungsfaktor R <sub>30,60</sub>	Japanische Duktilitätskoeffizienten		Biegefähigkeitsbereich
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>				Zähigkeit kNmm	Restfestigkeit MPa	
NASSPRITZBETON								
Standard / Matte	-	-	-	7,2	-	-	-	-
Stahlfaser								
F1	0,51	40	0,29	8,3	22	11	1,32	II
F3	0,51	40	0,41	8,9	38	21	2,63	II-III
F3	0,76	60	0,57	9,3	43	23	3,20	III
Kunstfaser								
S1	1,0	9,3	0,82	8,2	40	19	2,66	III
S1	1,5	14,0	1,08	8,3	59	27	3,66	III-IV
S2	1,0	9,3	0,92	7,8	45	23	3,64	III-IV
S3	0,5	4,6	0,42	8,4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
S3	1,0	9,1	0,82	8,4	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
S4	0,55	5,0	0,60	8,2	n.v.	0,8	0,11	0
TROCKENSPRITZBETON								
Standard / Matte	-	-	-	6,0	-	-	-	-
Stahlfaser								
F2	0,64	50	0,42	6,0	31	15	1,94	II
F3	0,76	60	0,59	7,2	55	30	3,64	III

Tab. 5: Duktilitätskennwerte nach ASTM C1018 und /2/, 28 Tage

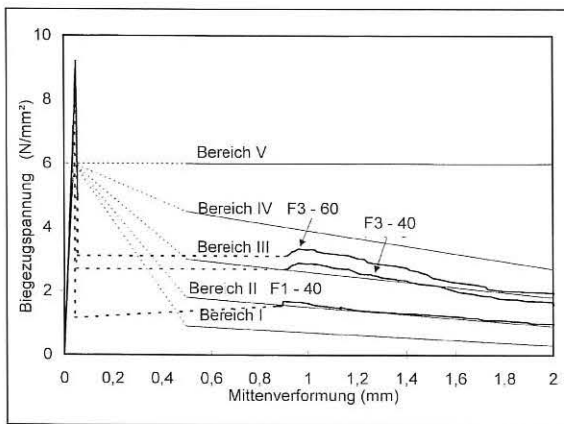


Bild 2: ASTM C1018 Last-Verformungsdiagramm für Biegebalken aus stahlfaserbewehrten Naßspritzbetonen

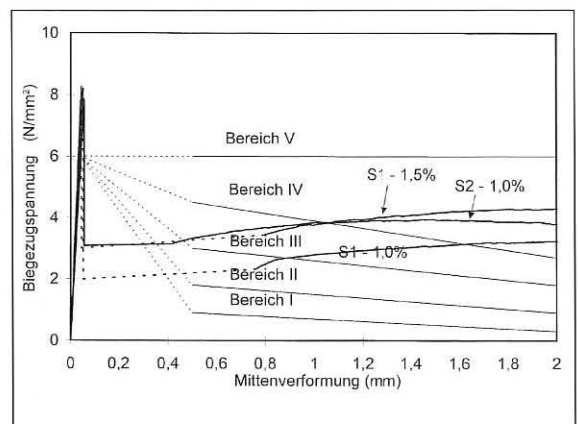


Bild 4: ASTM C1018 Last-Verformungsdiagramm für Biegebalken aus kunstfaserbewehrten Naßspritzbetonen

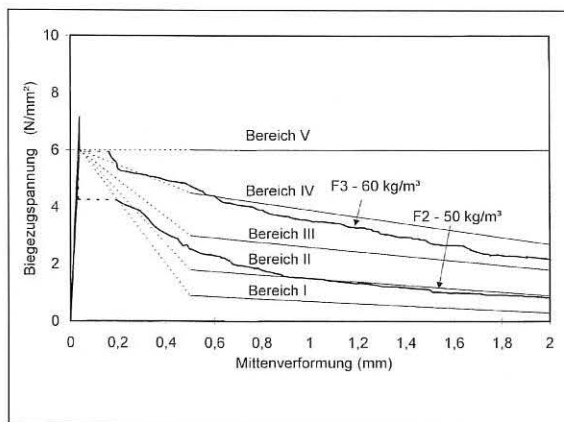


Bild 3: ASTM C1018 Last-Verformungsdiagramm für Biegebalken aus stahlfaserbewehrten Trockenspritzbetonen

risse öffneten sich typischerweise im Muster eines dreistrahligen Sternes. Stahlfaserbewehrte Platten wiesen generell eine sehr gute Tragfähigkeit unmittelbar nach Öffnen des ersten Risses auf. Sie verloren jedoch mit zunehmender Verformung schnell an Belastbarkeit, was anhand der geringen Energieaufnahme, dargestellt in Tabelle 6, deutlich wird. Mattenbewehrter Spritzbeton wies bei höheren Verformungen eine wesentlich bessere Duktilität auf. Spritzbeton mit Polymerfasern jedoch erreichte mit Abstand die beste Duktilität. Insbesondere die Fasern S1 und S2 verliehen den Spritzbetonplatten ausgesprochen füllige Last-Verformungs-Kurven, was sich in der absorbierten Energie (siehe Tabelle 6) widerspiegelt.

### 3.3.5 Südafrikanischer Plattentest

Prüfstation

Der Südafrikanische Plattentest beruht auf einer Prüf-

Versuch wird nach Erreichen von 40 mm Mitterverformung beendet. In dieser Studie wurden maximale Reißlasten von 33 bis 41 kN gemessen. Platten-

Mischung	Fasergehalt*		In-situ Bewehrungsgehalt Vol.-%	Last kN		Energieaufnahme
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>		Rißöffnung	10 mm	Nm = J 0-40 mm
<b>NASSPRITZBETON</b>						
Standard	-	-	0	33	-	-
Matte 4 x 4 8/8	-	-	0,36	33	17	337
6 x 6 6/6	-	-	0,34	33	14	384
Stahlfaser						
F1	0,51	40	0,29	33	4,1	121
F3	0,51	40	0,41	40	5,2	210
F3	0,76	60	0,57	41	8,0	262
Kunstfaser						
S1	1,0	9,3	0,82	35	19	589
S1	1,5	14,0	1,08	35	29	894
S2	1,0	9,3	0,92	37	25	608
S3	0,5	4,6	0,42	37	6,8	163
S3	1,0	9,1	0,82	35	14	294
S4	0,55	5,0	0,60	40	2,8	125
<b>TROCKENSPRITZBETON</b>						
Standard	-	-	0	35	-	-
Matte 4 x 4 8/8	-	-	0,36	41	14	270
6 x 6 6/6	-	-	0,34	34	16	389
Stahlfaser						
F2	0,64	50	0,42	36	3,7	139
F3	0,76	60	0,59	37	6,3	223

\* im Ausgangsgemisch

Tab. 6: Rißlast, Last bei 10 mm Mittenverformung und Energieaufnahme, Australische Testplatten

methode, die Kirsten [5] entwickelt hat und die von den Autoren in einigen Details modifiziert wurde. Bild 5 skizziert die Teststation.

Die 160 x 160 x 8 cm große Spritzbetonplatte wird im Alter von 28 Tagen auf eine Wasserpresse mit quadratischen Abmessungen (90 x 90 cm) aufgelegt und mittels 4 Ankerstäben im Raster von 1,0 x 1,0 m gegen die Presse gespannt. Die Ränder der Platte werden von 4 Stahlhohlprofilen, die auf jeweils 2 hydraulischen Wagenhebern ruhen, in Position gehalten. Damit können die Plattenränder während des Prüfvorganges nicht nach unten ausweichen, während sich die Plattenmitte aufwölbt. Die Zwängungen infolge der Randunterstützung, der Anker und der von der Wasserpresse ausgeübten gleichmäßigen Flächenlast sollen eine möglichst naturnahe Simulation eines Gebirgsbruches ermöglichen, dem der Spritzbeton Widerstand entgegenzusetzen hat.

Eine Aluminiumbrücke, die die eingebaute Testplatte überspannt, trägt eine Sonde, die die Mittenverformung der Testplatte mißt. Ein Drucksensor am Wassereinlaß der Presse mißt kontinuierlich den Wasserdruck im Inneren der Presse, der proportional zu der auf die Testplatte ausgeübten Flächenlast ist.

Druck und Mittenverformung werden im Sekunden-takt von einem angeschlossenen Computer abgefragt und gespeichert. Eine Prüfung beginnt mit einer entspannten Wasserpresse und endet nach etwa 40 Minuten, wenn die dann gerissene Platte eine Mittenverformung von 15 cm erreicht hat.

#### Rißbild

Zusätzlich zur Aufnahme der Last-Verformungskurve wurde die Entstehung der Oberflächenrisse und das Wachstum der Rißweiten beobachtet. Rißweiten wurden generell bei etwa 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 und 15 cm Mittenverformung gemessen.

Erste Risse bildeten sich im allgemeinen bei etwa 1 bis 2 mm Mittenverformung. Generell bildeten die ersten 4 Risse annähernd ein Kreuz, das die Platte in Viertel aufteilte. Mit zunehmenden Mittenverformungen bildeten sich weitere Risse nahe der Ankerstäbe und zwischen den Primärrissen. Bei 15 cm Mittenverformung lagen die maximalen Rißweiten generell bei 4 cm oder darüber. Die mit den synthetischen Fasern S1 und S2 bewehrten Platten hatten maximal 3 cm Rißweite, was auf gute Lastverteilung schließen läßt. Hingegen öffneten sich die größten Risse in unbewehrten Platten oder Platten mit versagender Bewehrung auf über 4 cm.



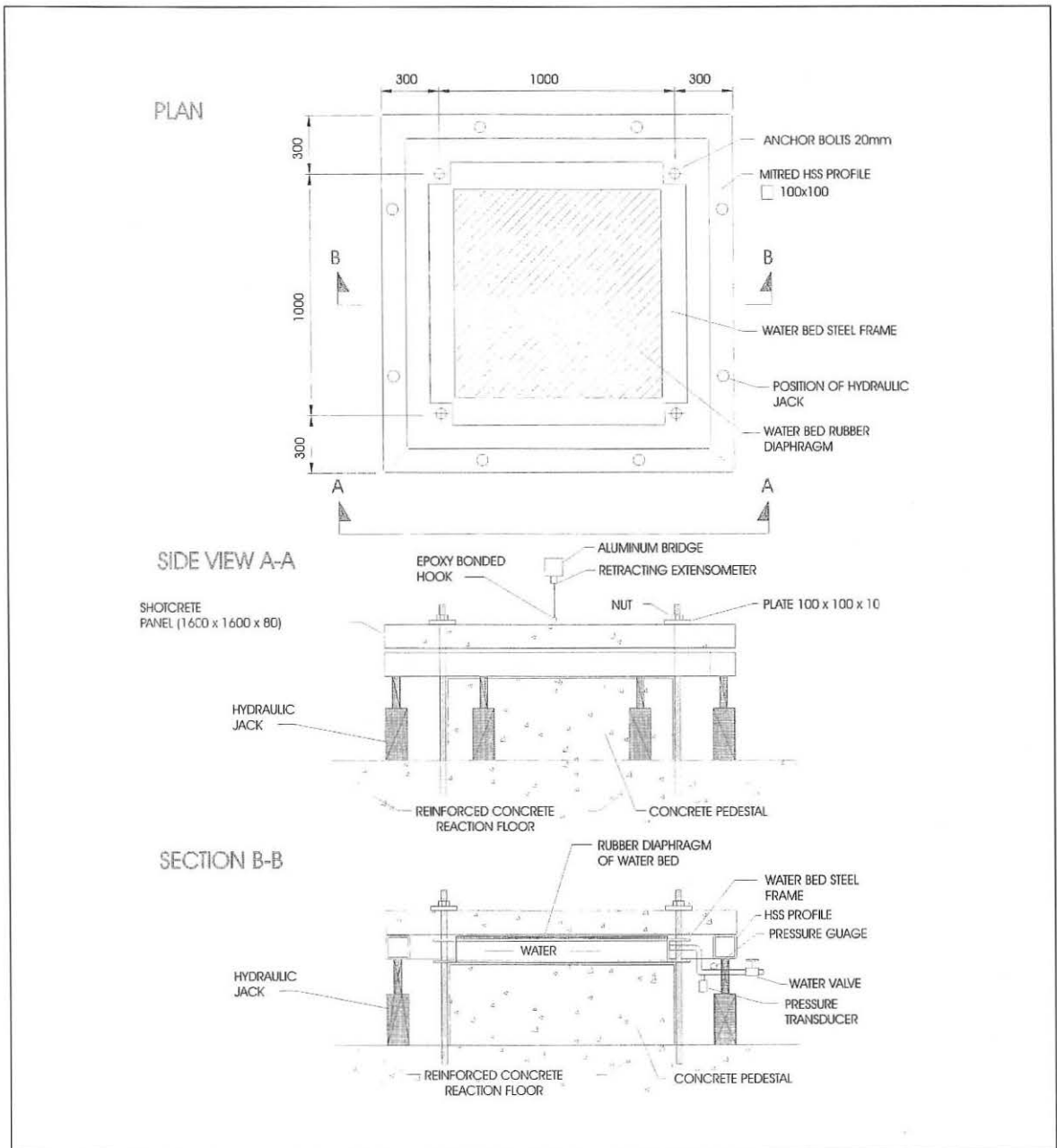


Bild 5: Versuchsaufbau des Südafrikanischen Plattentests

#### Duktilität

Die Bilder 6 bis 10 zeigen die Last-Verformungskurven ausgewählter Testplatten. Mit Ausnahme der mit den Kunstfasern S1 und S2 bewehrten Platten verloren alle Platten einen Großteil ihrer Duktilität vor Erreichen von 10 cm Mittendurchbiegung. Daher enden die dargestellten Kurven bei einem Grenzwert von 10 cm auf der Abszisse.

Tabelle 7 gibt einen Überblick über die erzielten Reißlasten und aufgenommenen Verformungsenergien. Die Verformungsenergien wurden hier vereinfachend mit der Fläche unter der Last-Verformungskurve gleichgesetzt, um einen Vergleich zwischen den Testplatten zu ermöglichen. An dieser Stelle soll

jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die tatsächlich absorbierte Verformungsenergie genauer durch eine Funktion von Wasserdruck und -volumen in der Wasserpresse wiedergegeben wird. Die Prüfstation war jedoch nicht mit einem Flußsensor ausgestattet, um den Volumenstrom zu ermitteln.

## 4. Schlußfolgerungen

### 4.1 Unbewehrte und mattenbewehrte Spritzbetone

Die in den Bildern 6 und 7 dargestellten Last-Verformungskurven zeigen, daß unbewehrter Spritzbeton im Südafrikanischen Test bereits nach etwa 2 cm Mit-

Mischung	Fasergehalt*		In-situ Bewehrung Vol.-%	Last kN		Mittenverformung mm		Energieaufnahme kNm = kJ		
	Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>		bei Rißöffnung	maximal	bei Rißöffnung	bei max. Last	0-50 mm	0-100 mm	
<b>NASSPRITZBETON</b>										
Standard	-	-	0	71	71	2,5	2,5	0,59	0,83	
Matte 4 x 4 8/8	-	-	0,36	76	90	1,3	26,4	3,55	5,08	
	-	-	0,34	74	90	2,3	30,1	3,63	4,40	
Stahlfaser	F1	0,51	40	0,29	78	80	1,2	8,9	3,01	4,67
	F3	0,51	40	0,41	86	91	1,5	7,7	2,45	3,79
	F3	0,76	60	0,57	92	103	1,2	8,1	3,51	5,22
Kunstfaser	S1	1,0	9,3	0,82	84	84	3,9	3,9	3,24	6,17
	S1	1,5	14,0	1,08	81	110	1,2	44,7	4,52	8,98
	S2	1,0	9,3	0,92	81	86	6,1	16,8	3,82	7,04
	S3	0,5	4,6	0,42	81	81	0,8	0,8	2,03	3,13
	S3	1,0	9,1	0,82	79	79	0,8	0,8	2,59	4,04
	S4	0,55	5,0	0,60	93	93	2,3	2,3	2,08	3,06
<b>TROCKENSPRITZBETON</b>										
Standard	-	-	0	80	80	1,2	1,2	0,84	1,16	
Matte 4 x 4 8/8	-	-	0,36	87	98	2,0	30,5	3,85	5,76	
	-	-	0,34	87	87	2,0	2,0	3,33	5,12	
Stahlfaser	F2	0,64	50	0,42	86	99	1,0	5,0	3,19	5,23
	F3	0,76	60	0,59	71	88	1,5	10,0	3,17	4,80

Tab. 7: Lasten, Verformungen, Energieaufnahme; Südafrikanische Platten

tendurchbiegung weniger als 20 % seiner Rißlast übertragen kann, während statisch bestimmt gelagerte Prüfkörper offensichtlich nach dem ersten Riß vollständig versagen. Im Gegensatz dazu büßt mattenbewehrter Spritzbeton zwar unmittelbar nach Überschreiten der Rißlast etwas an Tragfähigkeit ein, aber sobald sich die Risse weiten, steigt die Tragfähigkeit des Spritzbetones wieder an. Im Falle der in dieser Studie verwendeten symmetrisch eingebauten Bewehrungsmatten wurde im Südafrikanischen Plattentest sogar eine Zunahme des Tragvermögens über die Rißlast hinaus bei Mittenverformungen um 2 cm ermittelt. Die engermaschige Matte mit kleinerem Stabdurchmesser erwies sich dabei der grobmaschigeren Matte mit größerem

Stabdurchmesser als leicht überlegen. Lediglich bei großen Verformungen im Naßspritzbeton schien die grobmaschige Matte von Vorteil. Ähnliche Tendenzen wurden beim Australischer Plattentest beobachtet. Aufgrund der bei diesem Test statisch bestimmten Lagerung der Probekörper versagten jedoch unbewehrte Platten unmittelbar nach Erreichen der Rißlast.

#### 4.2 Stahlfaserbewehrter Spritzbeton

Bild 8 zeigt die Last-Verformungskurven von ausgewählten stahlfaserbewehrten Naßspritzbetonen im Südafrikanischen Test. Wie erwartet, hatte der Spritzbeton mit 60 kg/m<sup>3</sup> F3-Fasern die größte Duktilität.

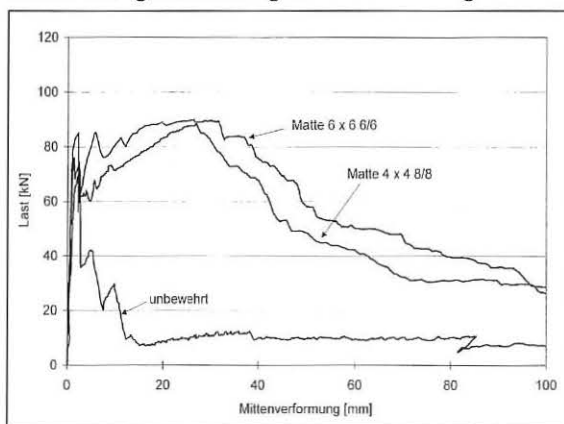


Bild 6: Südafrikanischer Plattentest, Last-Verformungsdiagramm für unbewehrten und mattenbewehrten Naßspritzbeton

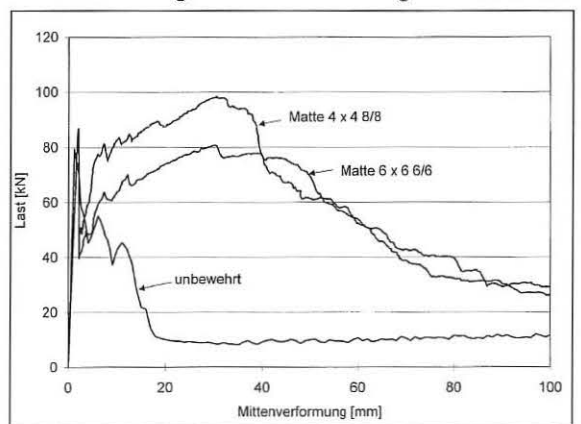


Bild 7: Südafrikanischer Plattentest, Last-Verformungsdiagramm für unbewehrten und mattenbewehrten Trockenspritzbeton

Der Vergleich zwischen den Spritzbetonen mit jeweils  $40 \text{ kg/m}^3$  F3- oder F1-Fasern zeigte, daß die F3-Fasern bei geringen Rißweiten etwas effektiver waren, während die F1-Fasern bei größeren Rißweiten mehr Last übertragen konnten.

Das Duktilitätsverhalten von Naßspritzbeton mit  $40 \text{ kg/m}^3$  Stahlfasern ähnelte beim Südafrikanischen Plattentest bis zu etwa 1 cm Mittendurchbiegung dem von mattenbewehrtem Spritzbeton. Bei größeren Mittendurchbiegungen erschien die Mattenbewehrung jedoch überlegen. Faserkonzentra-

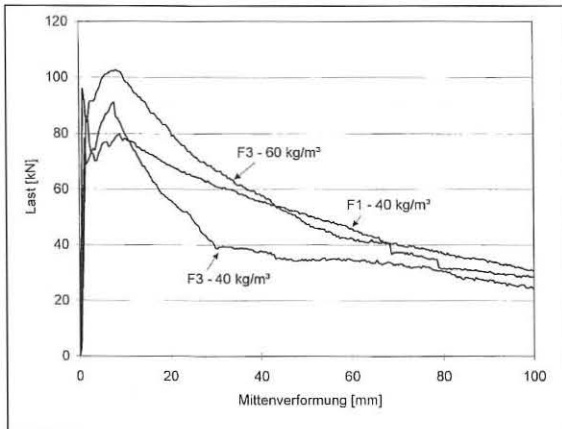


Bild 8: Südafrikanischer Plattentest, Last-Verformungsdiagramm für stahlfaserbewehrten Naßspritzbeton

tionen von  $60 \text{ kg/m}^3$  verliehen dem Spritzbeton bei kleinen Rißweiten ein größeres Lastaufnahmevermögen als die in dieser Studie verwendeten Stahlmatten. Bei größeren Rißweiten erschienen beide Bewehrungsarten gleichwertig.

Die folgenden Schlußfolgerungen liegen nahe:

- In geeigneten Konzentrationen können hochwertige Stahlfasern die Rißweiten potentiell besser beschränken als eine einfache Maschenbewehrung; demzufolge könnte eine Stahlfaserbewehrung bei strengen Anforderungen an die maximal zulässige Rißweite die bessere Wahl sein.
- Bei großen Verformungen des Spritzbetones können die verwendeten Stahlfasern und Bewehrungsmatten etwa gleichwertige Duktilität erzielen.

### 4.3 Kunstfaserbewehrter Spritzbeton

Die Bilder 9 und 10 zeigen die Last-Verformungsdiagramme ausgewählter kunstfaserbewehrter Spritzbetone im Südafrikanischen Plattentest. Fibrillierte Fasern, die der Pumpbarkeit des Spritzbetones wegen nur mit maximal 0,55 Vol.-% verarbeitet werden konnten, zeigten relativ gute Lastübertragung unmittelbar nach Öffnen des ersten Risses. Bei zunehmender Verformung verlor solcherart bewehrter

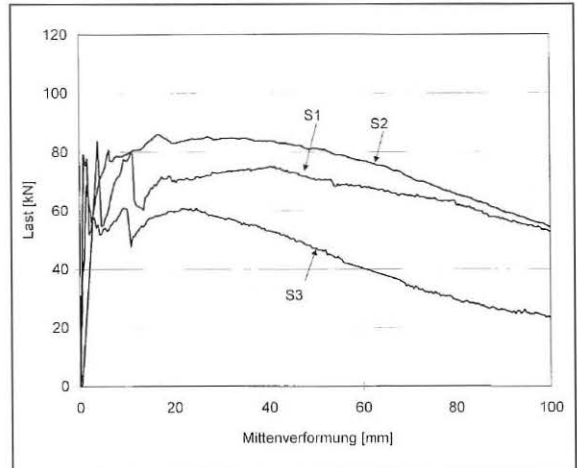


Bild 9: Südafrikanischer Plattentest, Last-Verformungsdiagramm für Naßspritzbeton mit 1,0 Vol.-% Kunstfaserbewehrung

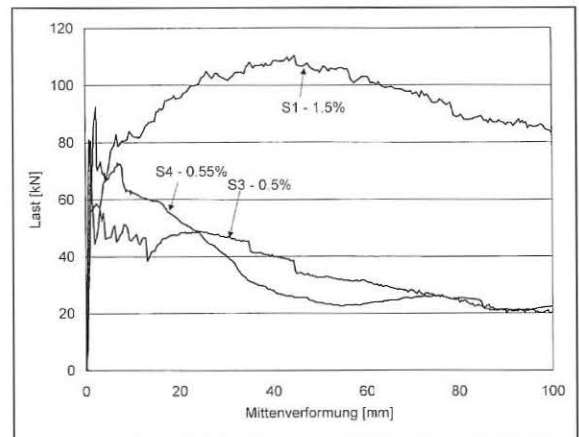


Bild 10: Südafrikanischer Plattentest, Last-Verformungsdiagramm für Naßspritzbeton mit von 1,0 Vol.-% dosierter Kunstfaserbewehrung abweichendem Fasergehalt

Spritzbeton jedoch rapide an Tragfähigkeit. Der mit 1,0 Vol.-% S3-faserbewehrte Spritzbeton zeigte hingegen gute Duktilität über einen weiten Verformungsbereich. Die neuentwickelten Kopolymerfasern S1 und S2 verliehen dem Spritzbeton bei 1,0 Vol.-% und 1,5 Vol.-% Zugabemenge außergewöhnlich gute Duktilität, die selbst bei 15 cm Mittendurchbiegung die Duktilität der mattenbewehrten Spritzbetone übersteigt. Die mit 1,5 Vol.-% S1- oder 1,0 Vol.-% S2-Fasern bewehrten südafrikanischen Platten wiesen bei Mittendurchbiegungen um 5 cm sogar eine Zunahme der Tragfähigkeit über die Rißlast hinaus auf. Während also die fibrillierten Fasern durchaus einen nennenswerten Bewehrungseffekt bei sehr kleinen Rißweiten aufwiesen, waren die diskreten Kunstfasern den Mattenbewehrungen durchaus ebenbürtig, in einigen Fällen sogar weit überlegen.

In Anwendungsfällen, die einen Zusammenhalt des Spritzbetones selbst bei sehr großen Verformungen erfordern, mögen solche Kunstfasern sogar die effektivere Bewehrungsart sein.

## 5. Literatur

### [1] Morgan, D.R.:

Advances in Shotcrete Technology for Support of Underground Openings. ASCE Shotcrete for Underground Support V; 1990, Seiten 358 - 382.

### [2] Morgan, D.R., Chen, L., Beaupré, D.:

Toughness of Fibre Reinforced Shotcrete. ASCE Shotcrete for Underground Support VII, Telfs, Austria, 1995, Seiten 66 - 87.

### [3] Bernard, S.:

Report - Fibre Reinforced Concrete Tests for Synthetic Industries Inc., University of Western Sydney Nepean, Australia, April 1998.

### [4] EFNARC (Hrsg.):

European Specification for Sprayed Concrete. European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures, Hampshire, 1996.

### [5] Kirsten, H.A.D.:

Comparative efficiency and ultimate strength of mesh and fibre reinforced shotcrete as determined from full-scale bending tests. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 92, No. 11/12, Nov./Dec. 1992, Seiten 03 - 323.