

# Entwicklung des stahlfaserbewehrten Naßspritzbetons in Norwegen

## Development Of The Steel Fibre Reinforced Wet Shotcrete In Norway

M. Sc. Civ. Eng. Øyvind Skåtun, Christiania Spigerverk AS, Oslo

Trockenspritzbeton und Netzbewehrung gehören in der heutigen norwegischen Spritzbetontechnologie zur Vergangenheit. Es werden überwiegend Naßspritzanlagen mit Spritzmanipulatoren eingesetzt und 60 % des Naßspritzbetons ist stahlfaserbewehrt. Die Vorteile der Naßspritzmethode sind eine hohe Leistung, geringer Rückprall und das bessere Arbeitsmilieu.

Durch die Verwendung von Zusatzmittel und Mikrosilika wird der Naßspritzbeton in gleicher Qualität wie Trockenspritzbeton hergestellt. Ein Spritzbeton der Festigkeitsklasse B 35 wird heute normalerweise in den norwegischen Tunnels gefordert.

Ersetzt man die Netzbewehrung durch Stahlfaserbewehrung, vermeidet man eine gefährliche Arbeitsphase mit hohem Zeitaufwand. Kürzere Abschlagzeiten bringen ökonomische Vorteile für den Einsatz der Stahlfasern, selbst wenn der Materialpreis gegenüber einer Netzbewehrung höher liegt. Qualitativ weist Beton mit 1 Vol % EE-Fasern eine höhere Biegezugfestigkeit und gleich gute Duktilität wie Beton mit Netzbewehrung gleicher Auftragsstärke auf.

Die Faserbewehrung ergibt einen dichteren Beton mit besserer Haftzugfestigkeit an der Felsoberfläche. Der Zusatz von 1 Vol % EE-Fasern ist ein normaler Bestandteil des norwegischen Spritzbetons geworden und schafft sowohl für den Bauherrn als auch den Unternehmer ökonomische Vorteile.

---

In modern Norwegian shotcrete technology dry shotcrete and mat reinforcement belong to the past. In most cases the wet shotcreting method by means of shotcrete manipulators is being used and 60 % of the wet shotcrete is reinforced by steel fibres. The advantages of the wet shotcreting method are high output, small rebound and better working conditions. By using additives and microsilica, wet shotcrete of the same quality as dry shotcrete can be produced. In general, a shotcrete of strength class B 35 is nowadays specified for tunnels in Norway.

By using a steel fibre reinforcement instead of the mat reinforcement, a critical and time-consuming operation can be avoided. This time-saving procedure results in economical advantages for the use of the steel fibre reinforcement, even though its price is higher than the price of the mat reinforcement. As far as the quality is concerned, concrete containing 1 per cent by volume of steel fibres shows a higher load-bearing capacity and equally good ductility as concrete with mat reinforcement of the same thickness.

The steel fibre reinforcement increases the concrete density and improves the adhesion of the concrete on the rock surface. The admixture of 1 per cent by volume of steel fibres for shotcrete has become normal practice in Norway, providing economical advantages for the owner as well as for the contractor.

---

Wenn man zehn Jahre zurückblickt, war das Trockenspritzen mit Netzbewehrung bei den norwegischen Spritzbetonarbeiten dominierend. Ende der 70iger Jahre gab es eine starke Entwicklung in der Spritzbetontechnologie. Als Stichwörter dürfen erwähnt werden:

- Spritzbetonroboter - Leistung, Arbeitsmilieu
- Naßspritzen - Leistung, Qualität, Arbeitsmilieu, Rückprall
- Mikrosilika und Zusatzmittel - Eigenschaften des Frisch- und Festbetons
- Stahlfasern - Bewehrungsnetze ersetzen, hohe Vortriebsgeschwindigkeit

Die Bauunternehmer sahen große Möglichkeiten zu wirtschaftlichen Einsparungen und zusammen mit Ausstattungs- und Materiallieferanten sowie Forschungsinstitutionen wurde die Forschung und Entwicklung intensiviert. Heute wird fast zu 100 % mit dem Naßspritzverfahren gespritzt und davon ist etwa 70 % stahlfaserbewehrter Spritzbeton.

#### Naßspritzen mit Robotern

Heute werden alle Spritzbetonarbeiten in Tunnels und im Bergbau mit Naßspritzrobotern ausgeführt (Abb. 1).

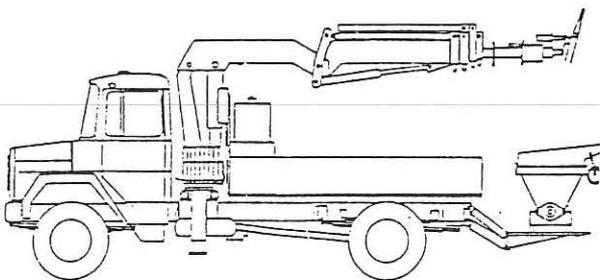


Abb. 1: Robocon 500 DH

Leistung: 2 - 12 m<sup>3</sup>/h mit oder ohne Fasern

Reichweite: vertikal: 14 m, horizontal: 10 m

Abmessungen: Höhe 3,65 m, Breite 2,5 m, Länge 7,5 m

Antrieb: Diesel-hydraulisch

Luftbedarf: 17 m<sup>3</sup>/min bei 7 bar

Die am meisten verwendeten Pumpen sind Monopumpen (ergeben einen stetigen Betonstrom). Der Operateur steuert das Spritzmundstück von einem tragbaren Steuerpaneel. Dadurch ergibt sich eine bessere Übersicht und ein sicherer Arbeitsplatz. Das Naßspritzverfahren hat im Vergleich zum Trockenspritzen viele Vorteile.

- Hohe Leistung (kurzzeitig 20 m<sup>3</sup>/h, längerfristig 7 - 9 m<sup>3</sup>/h).
- Niedriger Rückprallverlust (5 - 10 % gegenüber 30 - 50 % beim Trockenspritzen).
- Gleichmäßige Qualität (konstanter Wasser/Zement-Wert, bessere Kontrolle der Betonqualität).
- Besseres Arbeitsmilieu (eingeatmeter Staubinhalt reduziert).

#### Mikrosilika und Zusatzmittel

Es wird öfters behauptet, daß mit dem Trockenspritzverfahren eine bessere Qualität als mit dem Naßspritzverfahren erreicht wird. Die Entwicklung und Verwendung von Mikrosilika, von wasserreduzierenden, luftzusetzenden bzw. reduzierenden Zusatzmitteln, hat dies geändert. Betonqualitäten bis 100 Mpa können gespritzt werden - (in solchen Fällen setzt die Zuschlagsqualität Grenzen). Gewöhnlich wird in norwegischen Tunnels heute ein B 35 gefordert, aber Spritzbetonarbeiten mit einem geforderten B 55 sind schon ausgeführt worden. Mikrosilika (2 - 8 % des Zementgewichtes sind normal) ergibt viele Vorteile:

- verbesserte Pumpbarkeit und keine Separation
- reduzierter Zementgehalt
- verbesserte Haftzugfestigkeit zur Felsoberfläche und Bewehrung
- erhöhte Kohäsion ergibt einen klebrigeren Beton und niedrigeren Verbrauch von Erstarungsbeschleunigern
- wesentlich reduzierte Permeabilität.

Der erhöhte Wasserbedarf wird bei der Verwendung von wasserreduzierenden Zusatzmitteln ausgeglichen und das erhöhte Schwindpotential wird bei der Verwendung von aufgespritzten Membranen reduziert. Es werden gewöhnlich Zementgehalte von 400 bis 500 kg/m<sup>3</sup> verwendet.

Obwohl dies für eine Ausgangsmischung relativ hoch ist, kann man beim Trockenspritzbeton wegen der hohen Rückprallverluste an der Wand noch höhere Zementgehalte vorfinden. Im Rückprall findet sich nämlich ein hoher Gehalt an Zuschlagsstoffen und ein niedrigerer Zementgehalt.

Bei Verwendung von Zusatzmitteln kann ein Beton mit einem Wasserzementwert bei 0,3 mit guter Pumpbarkeit (Slump 20 - 25 cm) und kontrolliertem Luftgehalt an die Wand gespritzt werden. Die Festigkeitsentwicklung kann mit Hilfe der Zementart und der Temperatur der Ausgangsmischung gesteuert werden. Bei Sicherungsarbeiten in einem Tunnel ist eine schnelle Festigkeitsentwicklung von größter Bedeutung.

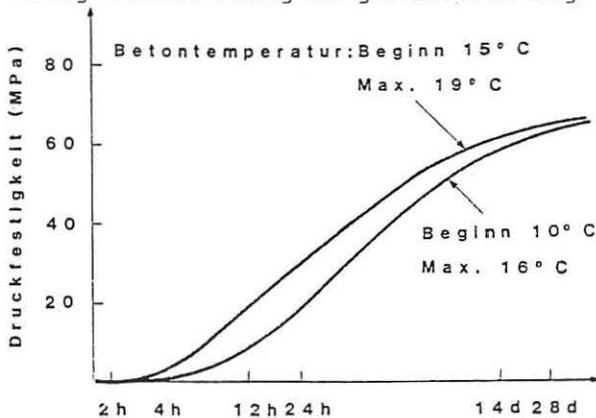


Abb. 2: Festigkeitsentwicklung eines stahlfaserbewehrten Naßspritzbetons (Druckfestigkeit an Bohrkernen  $\varnothing$  60 mm,  $h/d = 1$ ); Zement:Zuschlag:Mikrosilika = 1 : 3 : 0,1 1 Vol.% 18 mm EE-Fasern; W/Z = 0,5; 20 l/m<sup>3</sup> Spritzbetonbeschleuniger

Versuche haben gezeigt, daß sich die Haftzugfestigkeit genauso schnell entwickelt wie die Druckfestigkeit (Abb. 3, /1/).

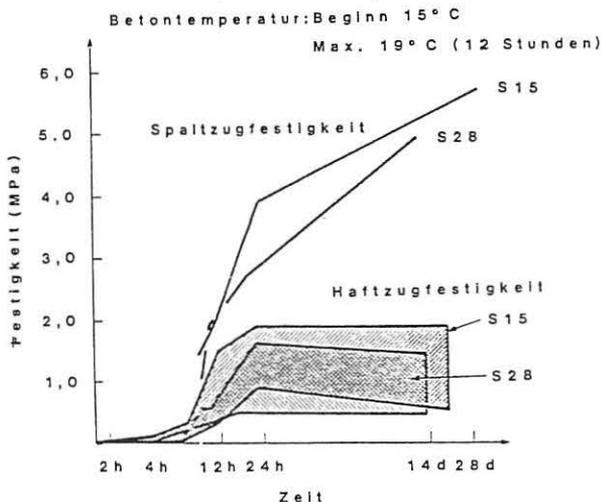


Abb. 3: Entwicklung der Spaltzugfestigkeit und

Haftzugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit an gebohrten Kernen  $\varnothing$  60 mm,  $h/d = 1$ , Haftzugfestigkeit aus Zugversuch an Beton-Fels-Kernen). Der strichlierte Bereich zeigt die Streuung der Haftzugfestigkeit. Für diese Versuche wurde 15 und 28 Liter/m<sup>3</sup> Beschleuniger verwendet. Betonmischung wie Abb. 2.

### Stahlfaserbewehrung

1986 wurde 70 % des Spritzbetons in Norwegen (etwa 40.000 m<sup>3</sup>) mit Stahlfasern bewehrt, d.h., etwa 2000 t Stahlfasern in den Beton eingebaut. Bewehrungsnetze sind nicht in Verwendung. Bis jetzt sind mehr als 100.000 m<sup>3</sup> stahlfaserbewehrter Beton in Norwegen gespritzt worden und dabei wurden zu fast 100 % EE 18,0 x 0,6 x 0,3 mm Stahlfasern verwendet (Abb. 4). Die normale Dosierung beträgt 1,0 Vol.% (75 kg/m<sup>3</sup>).

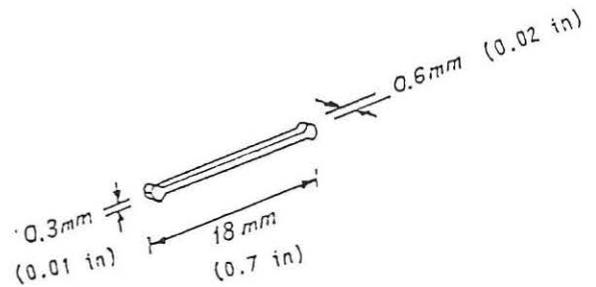


Abb. 4: EE (enlarged Ends) - Stahlfaser (Breitendstahlfaser). Die Fasern werden durch Schneiden von kalt gewalzten Stahlstreifen hergestellt. Der Stahl hat eine Zugfestigkeit von ungefähr 900 Mpa.

In der Zeit zwischen 1980 und 1982 wurde ein größeres Forschungsprojekt durchgeführt, um die Eigenschaften der Stahlfasern und der Netzbewehrung im Spritzbeton zu vergleichen /2/. Das Projekt wurde wirtschaftlich von dem Norwegischen Technischen Naturwissenschaftlichen Forschungsrat (NTNF) unterstützt.

Um größtmögliche realistische Versuchsbedingungen zu erhalten und gleichzeitig den Versuch kontrollier- und wiederholbar zu machen, wurde eine Versuchsaufstellung, die einen herabfallenden Felsbrocken simuliert, gewählt (Abb. 5 und 6).

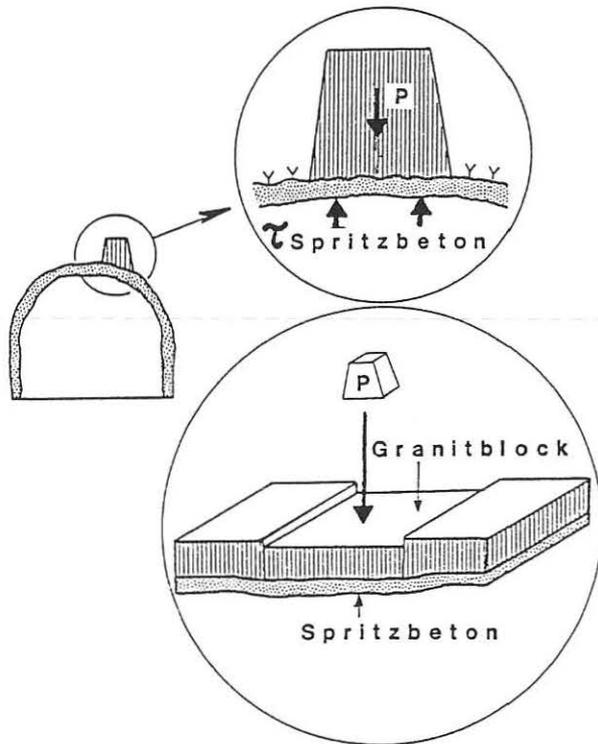


Abb. 5: Analogie zwischen einem herabstürzenden Felsblock im Tunnel und der Simulation am Versuchsrahmen.

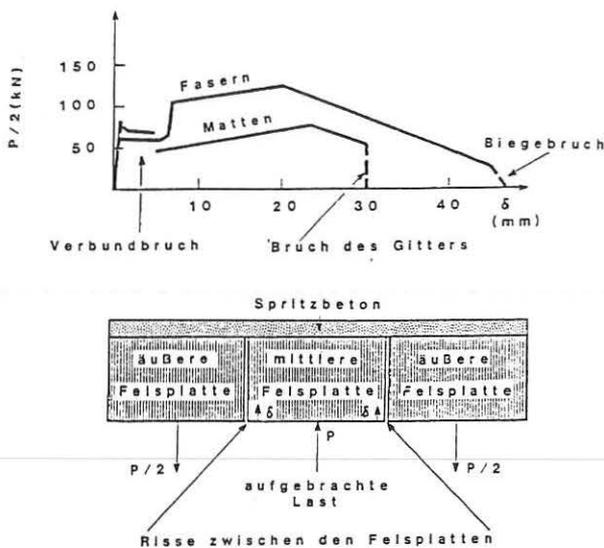


Abb. 6: Last-Verformungskurven des Großversuches "Simulation eines herabstürzenden Felsblockes" und prinzipielle Anordnung der Prüfkörper.

Auf Granitblöcke (3,7 m x 1,2 m) wurde 120 mm starker Spritzbeton aufgebracht. Dabei wurden 1 % EE 18 x 0,6 mm Stahlfasern im Spritzbeton verwendet bzw. zentrisch eine Bewehrungsmatte Q 131 eingearbeitet. Die Laststeigerung und Deformationen des in der Mitte gelegenen Blockes wurden gemessen. Typische Lastverformungs-

diagramme entnimmt man der Abb. 6.

Nachstehende Folgerungen wurden gezogen:

Mit 1 Vol.% 18 x 0,6 mm EE-Fasern erreicht man eine gleich gute Biegezugfestigkeit und gleich große Duktilität wie mit einem Netz Q 131.

Mit Stahlfaserbewehrung erreicht man eine bessere Haftzugfestigkeit zwischen dem Spritzbeton und dem Untergrund. Dieser Effekt ist durch die riß- und spannungsverteilende Wirkung der Fasern zu erklären.

Andere Versuche bestätigen, daß stahlfaserbewehrter Spritzbeton bessere Haftzugfestigkeiten zwischen dem Spritzbeton und Untergrund als unbewehrter oder netzbewehrter Spritzbeton erreicht. Beim Spritzen auf Netze entstehen Hohlräume hinter den Bewehrungseisen und verursachen Schattenwirkungen und Netzvibrationen. Dadurch reduziert sich das Zusammenwirken zwischen Beton und Bewehrung.

Die EE-Fasern (Breitendstahlfasern) besitzen fast 100 % des Spritzbetonmarktes in Norwegen. Die vergrößerten Enden (EE = Enlarged Ends) geben eine gute Verankerung in der Betonmatrix und damit eine hohe Effektivität. Selbst bei einem Fasergehalt von 1,5 Vol. % vermischen sich die Fasern sehr gut im Beton. Die EE-Fasern sind ein australisches Patent und werden von Christiania Spigerverk als einziger Produzent außerhalb Australiens produziert.

Es wird häufig die Frage gestellt, ob die Fasern im Beton korrodieren. Neulich wurde eine Untersuchung von Unterseetunnels zwischen Kårstø und Kaldstø durchgeführt, um die Beständigkeit von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton nach 3 - 4 Jahren unter hohem Seewasserdruck zu studieren /3/.

Die Spritzbetonarbeiten wurden von Astrup-Høyer, Robocon, ausgeführt /4/. Obwohl es Salzwasserdurchtritt gab und der Beton einen hohen Anteil an Chloriden beinhaltete, wurden keine Zeichen von Faserkorrosion im Spritzbeton gefunden. Es gab keine Zeichen von zerstörenden Reaktionen zwischen Zement und Seewasserkomponenten und der Beton besaß eine mittlere Druckfestigkeit von 32,8 MPa (gefordert B 25).

Ökonomie

Obwohl die Materialkosten für Stahlfasern 2 -

3 mal höher sind als für eine Netzbewehrung (ca. DM 2.000,--/t), ist die Verwendung von stahlfaserbewehrtem Beton im ganzen gesehen wirtschaftlich gut. Die Abschlagszeit kann halbiert werden und damit eine Kosteneinsparung im Vergleich zur Netzbewehrung mit selber Dicke von 5 - 15 % erreicht werden /5/.

In einem Versuch, ausgeführt von Svenska Vattenfall /6/, wurden die Kosten einer 10 cm starken Spritzbetondecke, mit Robotern ausgeführt, verglichen.

	Kosten pro m <sup>2</sup> inkl. Rück- prall in SKR	Rückprall (%)	Dauerlei- stung m <sup>3</sup> / Arbeits- schicht
*	164	30	9
**	104	10	20
***	313	30	
****	187	7	

- \* = Trockenspritzen unbewehrt
- \*\* = Naßspritzen unbewehrt
- \*\*\* = Trockenspritzen mit Netz
- \*\*\*\* = Naßspritzen mit Fasern

Trockenspritzen mit Fasern wurde nicht erprobt. Erfahrungen haben gezeigt, daß der Faserverlust in % größer ist als der Rückprallverlust und dabei noch höhere Kosten entstehen.

Der größte Vorteil für den Bauunternehmer ist der Wegfall der Befestigungsarbeiten des Beweh-

rungsnetzes, einer zeitraubenden und gefährlichen Arbeitsoperation. Die Stahlfaserbewehrung im Spritzbeton wurde eingeführt, um sich einen festen Platz in der Technologie zu erhalten und norwegische Bauunternehmer haben gelungene Arbeiten in den USA, China, Griechenland, Island und Equador mit norwegischer Spritzbetontechnologie ausgeführt.

#### Literatur:

- /1/ Skåtun Ø, Pedersen J (1983). Tidlig fasthet i fiberarmert sprøytebetong. BML-rapport 83.412 NTH, Trondheim, Norwegen
- /2/ Opsahl O.A., Standal T. und Astad U. (1982) Steel Fibre Reinforced Shotcrete, NTN-rapport 1053.09511, Oslo, Norwegen
- /3/ Vennesland Ø und Lund B. (1986) Investigation of the shotcrete used in the Kårstø Tunnel, NOTEBY Rapport 21303/2, Trondheim, Norwegen
- /4/ Tunnels and Tunneling, July 1983 pp 15-18
- /5/ O.A. Opsahl (1984) Use of Wet-process steel-fibreus shotcrete in tunnel linings Low Cost Road Tunnels, proceeding pp 307-315, Oslo Norwegen
- /6/ Arnlid C, Sjøberg K-Å, (1984) Våtsprutat Fiberbetong, Feltprov i Messaure, pp 21 - 22 Vällingby, Schweden