
Stahlfaserspritzbeton: Qualität und Sicherheit

STEEL FIBRES REINFORCED SHOTCRETE: QUALITY AND SAFETY

DIPL.-ING. MARC VANDEWALLE, N. V. BEKAERT S. A., BELGIEN

Durch die Zugabe von Stahldrahtfasern wird Spritzbeton homogen verstärkt. Die herkömmliche Mattenarmierung kann durch Stahldrahtfasern ersetzt werden. Dadurch werden eine Reihe von bekannten Problemen mit Matten vermieden und die Qualität des Spritzbetons positiv beeinflusst.

Die Stahldrahtfasern werden gemeinsam mit der Mischung und herkömmlichen Maschinen gespritzt. Beim Einsatz von Robotern kann der Düsenführer außerhalb der Gefahrenzone (Staub, Rückprall und Steinschlag) spritzen. Stahldrahtfasern geben dem Spritzbeton vor allem Zähigkeit und Duktilität.

Duktilität bedeutet Lastenverteilung, wodurch sich das Tragvermögen erhöht und eine Flexibilität erreicht wird, die Untergrundverformungen problemlos aufnimmt.

By adding steel fibres, shotcrete becomes homogeneously reinforced. The standard wire mesh can be eliminated solving a lot of practical problems and improving the quality of the shotcrete layer.

The steel fibres are incorporated in the mix as one more aggregate and can be applied with a standard shotcreting equipment. Using a remote controlled shotcrete robot, the reinforced outer lining can be applied in safe working conditions and outside the dust and rebound area.

Steel fibres transform shotcrete into a ductile material. Ductility means load redistribution which increases the load bearing capacity and gives the ability to absorb underground deformations.

1. Einführung

Moderner Tunnelbau ist ohne die Verwendung von Spritzbeton als Sicherungsmaterial kaum mehr denkbar.

Die jüngsten Entwicklungen dieser Technologie ermöglichten erhebliche Verbesserungen. Diese betreffen die Spritzmittel im eigentlichen Sinn, ebenso wie die Betonbeschaffenheit.

Die Verwendung von Stahlfasern bedeutet auf diesem Gebiet einen der größten Fortschritte.

2. Spritzbeton

Risse im Spritzbeton entstehen nicht nur infolge zu großer Lasten oder Bewegungen des Gebirges, sondern auch durch Schwinden und Temperaturschwankungen. Aus diesem Grund sollte Spritzbeton stets armiert werden.

Die Armierung erfolgte im allgemeinen durch Stahlmatten. Diese Matten wurden an den Tunnelbögen befestigt, in den meisten Fällen nach Aufspritzen einer ersten Schicht Spritzbeton.

Durch Sprengung geschaffene Tunnel weisen zahlreiche Profilunregelmäßigkeiten auf, was für die genaue und gleichmäßige Auskleidung des Hohlraums mit Stahlmatten ungünstig ist.

Diese geometrischen Unregelmäßigkeiten werden durch schlechte geologische Qualität des Felsens, also durch die Zerklüftung von Schichten, durch die Unregelmäßigkeit des Materials usw., noch verstärkt.

Diese Besonderheiten des Gesteins erzeugen Schwierigkeiten beim Betonspritzen, nämlich:

- Hohlräume zwischen der gespritzten Schale und dem Untergrund,
- Bewegung der gesamten gespritzten Schale durch das Gewicht des Frischbetons,
- Herabfallen von Frischbeton und
- an manchen Stellen ungenügende Betondeckung der Stahlmatte.

Die mechanischen Eigenschaften des Ausbausystems werden dadurch verschlechtert.

Das Anbringen von Matten ist in zweifacher Hinsicht aufwendig:

- direkt: wegen der nötigen Arbeitskräfte und dem benötigten großen Betonverbrauch (Einbetten der Armierung) und
- indirekt: wegen der Auswirkung auf die Dauer des Arbeitsvorganges.

Das Anbringen der Stahlmatten ist im ganzen Arbeitsprozeß die einzige nicht automatisierbare Arbeit. Ein großer Anteil der Gesamtbauzeit wird für das Befestigen dieser Stahlmatten verwendet und Zeit ist bekanntlich bei dieser Art von Bauarbeit ein entscheidender Faktor.

3. Stahlfaserarmierter Spritzbeton

Stahlfaserverstärkter Beton unterscheidet sich vom Normalbeton dadurch, daß bei der Herstellung Stahlfasern in einer Menge zugegeben werden, welche die Eigenschaften des Normalbetons für eine baupraktische Nutzung verbessern.

3.1 Verarbeitung

Stahlfaserspritzbeton hat dank seiner Homogenität den Vorteil, daß er an jeder Stelle seines Querschnittes Kräfte verschiedener Arten und verschiedener Richtungen aufnehmen und übertragen kann.

Die homogene Verteilung der Fasern im Beton ist die Voraussetzung dafür, daß man von einem gleichmäßig armierten Beton, der an jedem

Punkt der Masse die gleichen Eigenschaften hat, sprechen kann.

Die Stahlfasern werden dem Beton wie ein zusätzliches Granulat beigemischt. Die Verwendung der zu Plättchen zusammengeklebten Stahlfasern, die sich beim Mischen durch Feuchtigkeit und Reibung lösen, ermöglicht die Herstellung eines völlig homogenen Faserbetons mit herkömmlichen Mitteln und in der üblichen Zeit.

Stahlfaserspritzbeton wird mit konventionellen Mitteln im Naß- oder Trockenspritzverfahren verarbeitet.

Die Armierung mit Stahlfasern ermöglicht es, sofort nach dem Aufräumen des Abschlagmaterials eine armierte Stabilisierungsschicht aufzuspritzen, ohne daß Zeit für das Anbringen einer Stahlmatte verlorengeht.

Bei Verwendung ferngesteuerter Spritzarme erfolgt das Auftragen der armierten Schale, ohne daß sich jemand in den Einsturzgefahrenbereich begeben muß.

Stahlfaserspritzbeton bietet somit größere Sicherheiten für die Bauarbeiter.

3.2 Eigenschaften

Der Baustoff Faserbeton, dessen wesentliche Bestandteile die gleichen wie von Stahl- und Spannbeton sind, hat jedoch spezifische Eigenschaften.

Wenn der Hauptzweck der Zugabe von Stahlfasern zum Beton darin bestünde, dessen mechanische Eigenschaften wie Druckfestigkeit oder Biegezugfestigkeit zu verbessern, ist das Resultat begrenzt. Eine gewisse Verbesserung tritt ein. Wenn aber der einzige Zweck die Erzielung einer sehr großen Festigkeit des Betons ist, bietet der Markt andere Erzeugnisse und Verfahren an, die wirtschaftlicher und wirksamer als Fasern sind. Aber auch hochfester Beton ist sehr spröde.

In erster Linie werden Stahlfasern dem Beton beigemischt, um dem von Natur aus spröden Material eine bestimmte Dehnbarkeit zu verleihen. Beton hat stets Mikrorisse, die verschiedene Ursachen haben: nämlich Schwinden, thermische Beanspruchungen und sofortige Belastungen des Grünbetons. Wenn man auf das Material eine Zugkraft aufbringt, müssen sich die Zugtrajektorien krümmen, weil die Last nicht durch den

Riß hindurch übertragen werden kann (Bild 1), und die Spannungen an den Enden des Risses nehmen zu.

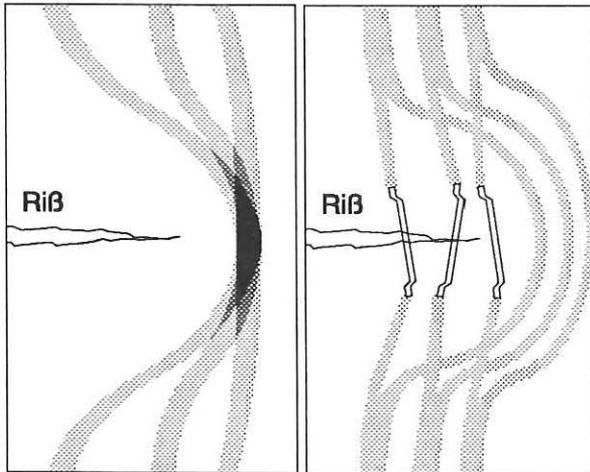


Bild 1: Die Aufgabe der Stahlfasern

Die relativ geringe Zugfestigkeit des Betons wird sehr schnell erreicht und überschritten; es entsteht ein Riß, und dieser Riß breitet sich ungehindert aus und führt zu einem Bruch.

Bei Stahlfaserbeton kann ein Teil der Zugkraft von den Fasern, die den Riß überbrücken, über den Riß übertragen werden.

Je besser die Fasern im Beton verankert sind und je mehr Fasern vorhanden sind, desto größer ist selbstverständlich die Wirkung der Fasern.

Eine gute Verankerung läßt sich mit Fasern erzielen,

- die möglichst lang sind und
- die eine gute mechanische Haftung besitzen.

Es ist darauf zu achten, daß ein gutes Verhältnis besteht zwischen der Verankerung der Stahlfasern im Beton und der Zugfestigkeit der Stahlfasern: die Fasern müssen so gut wie möglich im Beton verankert sein, damit sie bei Beanspruchung nur langsam aus dem Beton gezogen werden, ohne dabei zu brechen.

Dies garantiert:

- (1) Die Lastverteilung, die das erhöhte Tragvermögen von SFB ohne wesentliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, wie zum Beispiel der Biegezugfestigkeit, erklärt;
- (2) Die Zähigkeit des Stahlfaserbetons.

Dehnbarkeit und Zähigkeit sind die beiden Eigenschaften, die das richtige Verhalten der Auskleidungen von Tunnels und sonstigen unterirdischen Bauwerken garantieren.

Diese Dehnbarkeit des Materials erlaubt durch die aufeinanderfolgende Bildung plastischer Gelenke die Umverteilung der Spannungen.

Die Anwesenheit von Stahlfasern in der gesamten Spritzbetonmasse ermöglicht somit der Auskleidung die Aufnahme von Bewegungen im Untergrund und ferner das "Ertragen" größerer Lasten.

3.3 Normierung

In zwei Ländern, in den Vereinigten Staaten und in Japan, wurden für Stahlfaserbeton Normen geschaffen. Jede der Normen schreibt einen ähnlichen Biegeversuch vor (Bild 2), bei dem die Last in Abhängigkeit von einer Verformung mit konstanter Progression registriert wird.

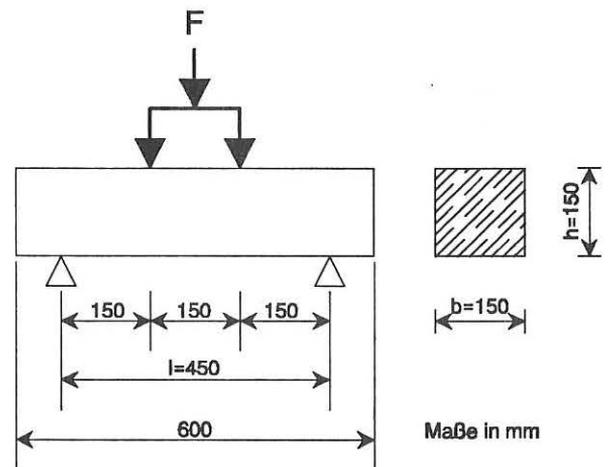
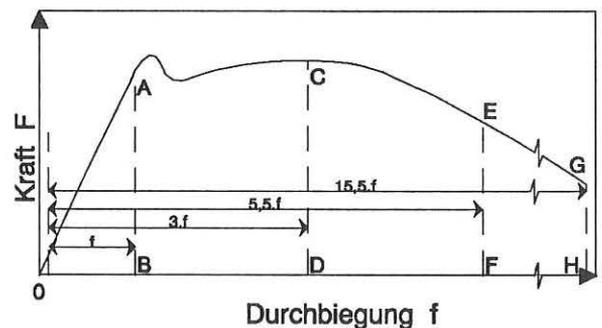


Bild 2: Biegeversuch



$$I_5 = \frac{0ACD}{0AB}$$

$$I_{10} = \frac{0AEF}{0AB}$$

$$I_{30} = \frac{0AGH}{0AB}$$

Bild 3: Bestimmung des Biegezähigkeitsfaktors (Zähigkeitsindex)

In der **amerikanischen Norm** wird die Definition des Zähigkeitsindex eingeführt (Bild 3).

Der Zähigkeitsindex ist das Verhältnis zwischen der bis zu einer gegebenen Verformung vom Prüfstück aufgenommenen Energie und der bis zum ersten Riß absorbierten Energie. Da der für verschiedene Verwendungszwecke vom Faserbeton geforderte Zähigkeitsgrad verschieden sein kann, wurden drei Zähigkeitsindexe festgelegt, die als I_5 , I_{10} und I_{30} bezeichnet werden und den Verformungen von 3 d, 5,5 d und 15,5 d entsprechen, wobei d die Verformung beim Auftreten des ersten Risses ist.

Man bezeichnet die Indexe mit I_5 , I_{10} und I_{30} weil diese Verformungen genau den Zähigkeitsindizes 5, 10 und 30 eines gedachten elastoplastischen Materials entsprechen.

Ein Nachteil des Versuchs besteht in der Schwierigkeit, die Verformung beim ersten Riß genau festzustellen. Es handelt sich um einen sehr geringen Wert mit einem beträchtlichen Einfluß auf den Zähigkeitsindex.

Es wurde ferner festgestellt, daß die Werte I_5 und I_{10} gegenüber dem Fasertyp und der verwendeten Dosierung relativ unempfindlich sind.

Die **japanische Norm** basiert auf dem gleichen Versuch. Die Zähigkeit wird durch die äquivalente Biegezugfestigkeit (β_A) definiert (Bild 4).

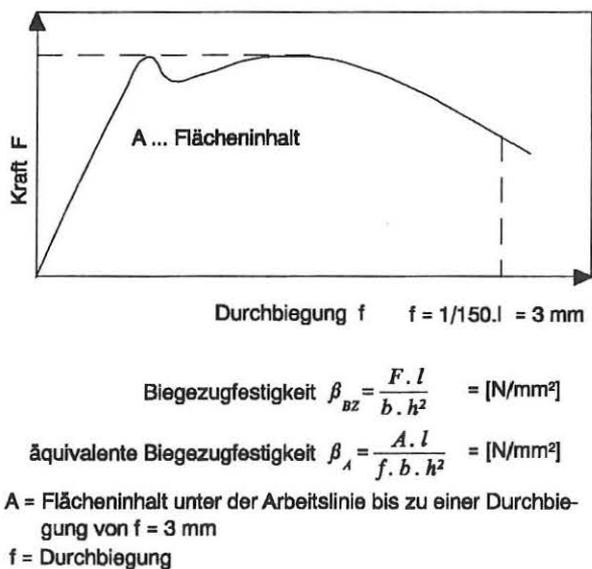


Bild 4: Bestimmung der äquivalenten Biegezugfestigkeit

Es muß darauf hingewiesen werden, daß, obwohl die an Proben gemessene Biegezugfestig-

keit durch den Zusatz von Fasern nur wenig zunimmt, das Tragevermögen bestimmter hyperstatischer Konstruktionen erheblich zunimmt. Dies ist die Folge einer Neuverteilung der Spannungen; einer Neuverteilung, die durch die Bildung plastischer Scharniere ermöglicht wurde. Die Zähigkeit ist in diesem Fall auch der bestimmende Faktor.

Bei Verwendung der β_A , unter Berücksichtigung geeigneter Sicherheitsfaktoren in den Berechnungen, hat diese Definition von β_A den großen Vorteil, daß man die wichtigste Eigenschaft des Faserbetons in die Dimensionierung einbeziehen kann.

3.4 Plattenversuch

Die französische SNCF, Abteilung Böden, Tunnel und Maurerarbeiten der Hauptabteilung Bau, hat als erste ein großes Versuchsprogramm zum Vergleich zwischen Stahlmattenspritzbeton und Faserspritzbeton durchgeführt. Dieses Programm ermöglicht es:

- aufzuzeigen, daß die Sicherheit eines Untergroundbauwerks in direktem Verhältnis zur Dehnbarkeit der Auskleidung steht,
- die Auswirkung verschiedener Fasertypen auf das Dehnverhalten von Beton zu prüfen und so in objektiver Weise die einzelnen auf dem Markt befindlichen Produkte zu bewerten und
- ein Dehnbarkeitskriterium zu schaffen und in Zusammenarbeit mit dem Laboratorium Alpes Essais, Grenoble, das Versuchsverfahren zu entwickeln, das es ermöglicht, den spezifischen Wert zu messen.

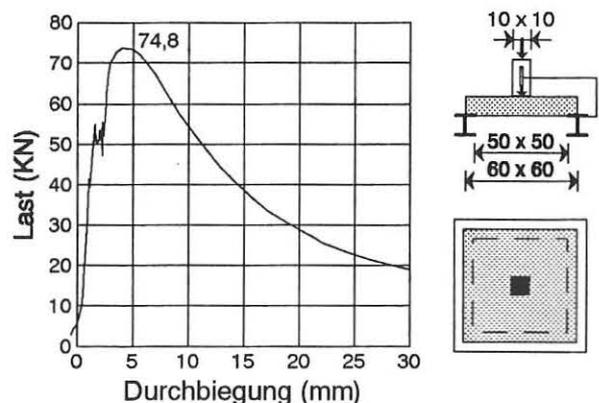


Bild 5: Last-Verformungs-Kurve Faserbeton mit 50 kg/m³ Dramix® ZP 30/050

Diese Werte werden über Druckversuche ermittelt. Im Testprogramm wurden 60 x 60 x 10 cm große Betonplatten gespritzt und durch einen

Metallrahmen allseitig unterstützt. Die Belastung erfolgte zentrisch mit einem 10 x 10 cm großen Stempel.

Die Druckenergie ist per Definition der Bereich zwischen der Last-Verformungs-Kurve und der X-Achse bis zu einer Verformung von 25 mm.

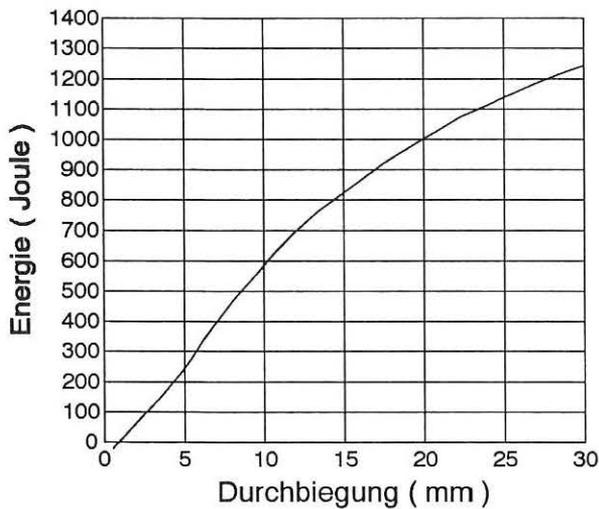


Bild 6: Energie-Aufnahme-Kurve Faserbeton mit 30 kg/m³ Dramix® ZP 50/.050

So schreibt die SNCF in ihrem Sondervorschriftenheft für Tunnel-Instandhaltungsarbeiten: "Die beim Druckversuch vom Material aufgenommene Energie muß über 500 Joule liegen".

4. Tunnelkonstruktion

Bei der Konstruktion von Tunnels ist der wichtigste Parameter der Untergrund. Ein wichtiges Erfordernis, das an die Tunnelauskleidung

gestellt wird, ist eine möglichst solide Haftung am Untergrund.

Die Funktion des stabilisierenden Stützmittels ist es, den Untergrund durch das Zulassen kontrollierter Verformungen zu stabilisieren - und nicht so sehr Belastungen aufzunehmen - wodurch das eigene Tragvermögen des Gebirges geweckt wird. Die erste Betonschicht ist im Vergleich zum Gebirge sehr flexibel, wodurch diese Schicht sehr großen Verformungen - ohne zu zerbrechen - standhalten kann. Dadurch kann eine Neuverteilung der Spannungen im Untergrund auftreten.

Spritzbeton ist ein wesentlicher Teil der modernen Tunnelkonstruktionsmethoden. Sowohl praktische, wirtschaftliche als auch technische Faktoren machen Stahlfaserbeton zu einem geeigneten Material für die Spritzbetontechnik.

5. Schlußbetrachtung

Die auf zahlreichen Baustellen gesammelten Erfahrungen zeigen, daß die Stahldrahtfaserarmierung eine anwendungsmäßig gut beherrschbare Lösung ist.

Eine Vergleichsanalyse mit der Stahlmattenanwendung zeigt ihren wirtschaftlichen Vorteil: eine einfache Zugabe der Stahldrahtfasern in der Mischanlage macht einen komplizierten und problematischen Arbeitsgang überflüssig.

Es besteht kein Zweifel daran, daß die technischen und wirtschaftlichen Vorteile des Stahlfaserspritzbetons sehr bald die Zahl der Anwendungen im Untergrundbau vergrößern wird.

