

Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau: Stand der Technik und Beispiele

Die Möglichkeiten und Gründe für den Einsatz von Stahlfaserbeton im Tunnelbau sind vielfältig, woraus die Vielzahl existierender Anwendungsvarianten resultiert. Die Spritzbetonbauweise ist bereits seit Jahren Stand der Technik und der folgende Beitrag gibt einen Überblick.

1 Einführung

Die Bereitschaft für den Einsatz von Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau steigt mit der Anforderung an Sicherheit, verfahrenstechnischer Vereinfachung und Bauzeitverkürzung, den die Verwendung des Baustoffes ermöglicht sowie den Kosten, die gegenüber einer herkömmlichen Konstruktionslösung aus Stahlbeton eingespart werden. Im Spritzbetonverfahren bietet der Stahlfaserbeton den Vorteil, dass der ausgesprochen komplizierte sowie zeitaufwändige Einbau der Bewehrung entfällt (Bild 1).

Nicht nur der Bauablauf wird beschleunigt, zudem wird auch die frühzeitige Aktivierung der Erstsicherung des Gebirges sichergestellt. Unter schwierigen geologischen Bedingungen treten zwischen dem Auffahren des Querschnitts und der Aktivierung der Sicherung, Auflockerungen im Gebirge auf. Bei schlechten Gebirgsverhältnissen erweist sich eine frühzeitige Tragwirkung der Sicherung als zielführend. Die frühe Tragfähigkeit wird durch das zügige Einbauverfahren und

Dipl.-Ing. Philipp Guirguis, Bekaert GmbH,
Technical Manager for Construction Products, Friedrichsdorf/D,
www.bekaert.de

die hohe Frühfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons erzielt. Die Zugabe der Stahlfasern im Spritzbetonverfahren erfolgt in der Regel über Dosiereinrichtungen direkt in das Bereitstellungsgemisch im Betonwerk. Beim Stahlfaserspritzbeton ist der Rückprall, der zu einem geringeren Fasergehalt in der Tunnelschale im Vergleich zum Bereitstellungsgemisch führt, zu beachten. Aufgrund des Auffahrprozesses ist eine Orientierung der Fasern senkrecht zur Auftragsrichtung zu beobachten, was aus Sicht der Trageigenschaften als positiver Effekt zu bewerten ist. Beide zuvor genannten Effekte führen beim Stahlfaserspritzbeton dazu, dass Prüfkörper zur Ermittlung des Energieabsorptionsvermögens, unter gleichen Bedingungen zum späteren Bauwerk hergestellt und ausgewertet werden. Je länger und dünner die Stahlfasern, desto positiver ist der Einfluss auf Duktilität, Tragfähigkeit und Energieab-

Steel Fibre Shotcrete in Tunnelling: State of the Art and Ex- amples

There are many possibilities and reasons for the application of steel fibre concrete in tunnelling, which account for the manifold number of existing uses. The shotcreting construction method has been state of the art for many years, which is reflected in the following report.

1 Introduction

The readiness to apply steel fibre shotcrete in tunnelling increases with demands on safety, process-technological streamlining and reducing the construction time, which facilitates the use of the material as well as costs, which are saved compared with a conventional reinforced concrete structural solution. With regard to the shotcreting method steel fibre concrete offers the advantage that there is no need for the extremely complicated and time-consuming installation of reinforcement (Fig. 1).

The construction process is speeded up. Furthermore the initial securing of the rock sets in at an early stage. Loosening of the rock occurs between driving the cross-section and activating the support given tricky geological conditions. In the case of poor rock conditions early activation of the bearing effect of the support helps achieve the target. This early bearing behaviour is attained by the speedy installation method and the early

setting strength. The addition of the steel fibres in the shotcreting process generally takes place via dosing units for the ready mix in the concrete plant. In the case of steel fibre shotcrete the rebound, which leads to a slight fibre content in the tunnel shell compared with the ready mix, must be taken into consideration. Owing to the driving process orientation of the fibres perpendicular to the direction of placement is to be observed, something which can be assessed as positive regarding the bearing characteristics. In the case of steel fibre shotcrete the 2 previously mentioned effects lead to test specimens being produced and evaluated to establish the energy absorption capacity under the same conditions prevailing at the subsequent structure. The longer and thinner the steel fibres are the more positive their influence on the ductility, bearing capacity and energy absorption capacity of the steel fibre shotcrete is. However the fibre length should be restricted to some 35 mm on account of processibility and should not exceed 2/3rd of the hose diameter.

sorptionsvermögen des Stahlfaserbetons. Allerdings ist aufgrund der Verarbeitbarkeit die Faserlänge auf ca. 35 mm zu begrenzen und sollte 2/3 des Schlauchdurchmessers nicht überschreiten.

2 Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons

Stahldrahtfasern werden dem Beton zugemischt, um neben einer Traglasterrhöhung, verschiedene mechanische Eigenschaften des Betons zu verbessern. Zu den maßgebenden Eigenschaften, die durch die Zugabe von Stahldrahtfasern deutlich verbessert werden, zählen:

- Duktilitätssteigerung unter Zug und Druck
- erhöhte Schlagfestigkeit
- verbessertes Ermüdungsverhalten
- geringere Abplatzneigung
- erhöhte Dauerhaftigkeit
- geringere Rissbreiten im Gebrauchszustand
- Biegetragfähigkeit in allen 3 Raumrichtungen

Der Einsatz von Stahlfaserbeton bietet im Vergleich zum Einsatz herkömmlicher Betonstahlbewehrung beim Spritzbetonverfahren im Tunnelbau deutliche Vorzüge. Hierzu zählen insbesondere erhöhte Arbeitssicherheit, Kosteneinsparungen bei den Bewehrungsarbeiten sowie Vereinfachung und Beschleunigung des gesamten Bauablaufs. Es ergibt sich eine bessere Homogenität der Spritzschicht, da keine Spritzschatten aufgrund Spritzen durch eine Bewehrung auftreten. Hinzu kommt, dass weniger Überprofil ausgespritzt werden muss, da den Konturen des Gebirges besser gefolgt werden kann.



Typisches Einbauverfahren von Mattenbewehrung im Tunnelbau
Typical installation method for mat reinforcement in tunnelling

3 Normierung von Stahlfasern in der EN 14889-1

In Europa sind Stahlfasern zur Verwendung in Beton mit dem CE-Zeichen zu kennzeichnen. Die Mindestanforderungen an Stahlfasern werden in der harmonisierten Norm EN 14889-1 [6] beschrieben. Die Norm legt Anforderungen für Stahlfasern für Beton, Mörtel und Einpressmörtel für tragende und andere Zwecke fest. Es gibt 2 unterschiedliche Systeme der Konformitätsbescheinigung:

- System 1 – Stahlfasern für tragende Zwecke und
- System 3 – Stahlfasern für andere Zwecke.

Die Norm definiert tragende Zwecke wie folgt: "Bei der Verwendung von Fasern für tragende Zwecke tragen die zugegebenen Fasern zur Trag-

2 Material Properties of Steel Fibre Shotcrete

Steel wire fibres are mixed with concrete, in order to improve various mechanical properties of the concrete quite apart from enhancing the bearing effect. The decisive characteristics, which are considerably improved through the addition of steel wire fibres, include:

- increased ductility given tension and pressure
- enhanced impact strength
- improved fatigue behaviour
- low propensity for spalling
- increased durability
- slighter crack widths in operational state
- bending tensile capacity in all 3 spatial directions

Compared to applying conventional reinforced concrete the application of steel fibre concrete affords clear advan-

tages in conjunction with the shotcreting method in tunnelling. In particular these relate to increased industrial safety, cost saving for the reinforcing operations as well as making the entire work cycle more straightforward and quicker. The sprayed layer is more homogeneous as no spraying shadows occur on account of spraying through reinforcement. In addition there is the fact that less overbreak has to be sprayed as the rock contours can be followed better.

3 Standardising Steel Fibres in the EN 14889-1

In Europe steel fibres for application in concrete have to be accorded the CE marking. The minimum requirements for steel fibres are described in the standardised norm EN 14889-1 [6]. The norm establishes require-

fähigkeit eines Betonbauteils bei.“ Demnach ist für fast alle praktisch relevanten Fälle eine Konformitätsbescheinigung nach System „1“ erforderlich

Um Verwechslungen vorzubeugen, sollten ausschließlich nach System „1“ überwachte und zertifizierte Stahlfasern mit zugehörigem EG-Konformitätszertifikat verwendet werden. In der Norm sind für die jeweils maßgebenden Eigenschaften der Fasern zulässige Toleranzen festgelegt. Um Unterschiede in der Leistungsfähigkeit einzelner Fasertypen transparent darzulegen, wird an einem Referenzbeton der Einfluss auf die Festigkeit von Beton getestet. Es ist die Mindestzugabemenge Stahlfasern definiert, die erforderlich ist, um in einem Prüfverfahren nach DIN EN 14651 [5] eine residuelle Biegezugfestigkeit von 1,5 N/mm² bei einer Rissöffnungsbreite von 0,5 mm und von 1,0 N/mm² bei einer Rissöffnungsbreite von 3,5 mm zu erreichen.

4 Europäische Norm für Spritzbeton in der EN 14487-1

In der europäischen Norm für Spritzbeton EN 14887-1 [2] wird die Verwendung von Fasern geregelt und erforderliche Testverfahren zur Ermittlung von Duktilität und Leistungsfähigkeit verschiedener Faserbetone beschrieben. Zwei unterschiedliche Testverfahren sind in dieser Norm aufgenommen:

Statisch unbestimmte Plattenprüfungen zur Ermittlung des Energieabsorptionsvermögens (Systemtragfähigkeit) nach EN 14488-5 [4] und statisch bestimmte Balkenprüfungen zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit nach EN 14488-3

[3]. Die EN 144887-1 [2] verweist somit bezüglich der Testverfahren auf weitere europäische Normen, die im anschließenden Kapitel aufgegriffen und erläutert werden.

Die Klassifizierung von Festigkeitsklassen und zugeordneter Durchbiegung nach EN 14488-3 [3] erfolgt gemäß Tabelle 1. Es ist wichtig zu beachten, dass der gewählte Festigkeitswert (S1-S4) auf keinem Punkt der Last-Verformungskurve im entsprechenden Verformungsbereich (D1 –D3) unterschritten wird.

Für das Energieabsorptionsvermögen definiert die EN 14488-5 [4] die in Tabelle 2 aufgeführten Klassen.

Erlaubt das Ergebnis statisch unbestimmter Plattenprüfungen eine Aussage über die Systemtragfähigkeit (sinnvollerweise heranzuziehen bei typisch rückverankerten Spritzbetonschalen), lässt das Ergebnis von Balkenprüfungen eine Aussage über die Querschnittstragfähigkeit zu (sinn-

ments for concrete, mortar and grouting mortar for bearing and other purposes. There are 2 different systems for certificating the conformity:

- System 1 – steel fibres for bearing purposes and
- System 3 – steel fibres for other purposes.

The norm defines bearing purposes as follows: “when applying fibres for bearing purposes the added fibres contribute towards the bearing capacity of a concrete element“. Accordingly a System “1“ certification of the conformity is necessary for practically all relevant cases. Thus only steel fibres monitored and certificated in accordance with System “1“ with the relevant EU certificate of conformity should be applied in order to avoid any confusion. The norm contains the permissible tolerances for the properties of the fibres applicable in each case. In order to present differences in the capabilities of the individual types of fibres in a clear manner

sidual bending tensile strength of 1.5 N/mm² given a crack opening width of 0.5 mm and of 1.0 N/mm² given a crack opening width of 3.5 mm in a test procedure in accordance with DIN EN 14651 [5].

4 European Norm for Shotcrete in the EN 14487-1

The European norm for shotcrete EN 14887-1 [2] defines the application of fibres and describes necessary test methods to determine the ductility and capabilities of various fibre concretes. Two different test methods are included in this norm: statically undefined slab tests to determine the energy absorption capacity (system bearing capacity) according to EN 14488-5 [4] and statically defined beam tests to determine the cross-section bearing capacity according to EN 14488-3 [3]. Thus the EN 144887-1 [2] refers to other European norms relating to test methods, which are taken up and explained in the following chapter.

The classification of strength classes and relevant deflection according to EN 14488-3 [3] takes place in keeping with Table 1. It is important to observe that the selected strength value (S1-S4) does not undershoot the load-deformation curve at any point of the corresponding deformation area (D1-D3).

The EN 14488-5 [4] defines the classes contained in Table 2 for the energy absorption capacity.

Should the result of statically undefined slab tests permit a conclusion relating to the system bearing capacity (appropriately determined from typical back-anchored shotcrete shells) to be reached, the outcome of beam

Verformungsbereich		Festigkeitsklasse (Mindestwert) in [MPa]			
	Verformung [mm]	S1	S2	S3	S4
D1	0,5 bis 1	1	2	3	4
D2	0,5 bis 2				
D3	0,5 bis 4				

Tabelle 1: Definition der residuellen Festigkeitsklassen

Deformation area		Strength class (min. value) in [MPa]			
	Deformation [mm]	S1	S2	S3	S4
D1	0,5 to 1	1	2	3	4
D2	0,5 to 2				
D3	0,5 to 4				

Table 1: Definition of the residual Strength Classes

vollerweise zu verwenden in einer Bemessung, in der die Querschnittstragfähigkeit als Materialwiderstand herangezogen wird).

the influence on the concrete's strength is tested on a reference concrete. The minimum amount of added steel fibre is defined, which is necessary to attain a re-

Energieabsorptionsklasse	Absorbierte Energie im Joule bei einer Durchbiegung bis maximal 25 mm
E500	500
E700	700
E1000	1000

Tabelle 2: Definition der Energieabsorptionsklasse

Insofern unterscheiden sich nicht nur die Testverfahren sondern auch die Ergebnisse derselben. Folglich können Ergebnisse von Plattenprüfungen nicht für Bemessungen herangezogen werden, in denen auf der Widerstandsseite die Querschnittstragfähigkeit angesetzt wird (üblicher Vorgang bei Tragwerksbemessungen).

5 Testverfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit

5.1 Plattenprüfungen nach EN 14488-5

Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern:

Das verformungsgesteuerte Testverfahren betrachtet einen quadratischen Prüfkörper mit der Abmessung 600 x 600 mm und einer Plattendicke von 100 mm (siehe auch Bild 12). Dieser wird unter Baustellenbedingungen gefertigt um die Effekte Faserorientierung und Faserrückprall zu berücksichtigen (Bild 2). Der Prüfkörper wird für den Test ringsum freidrehend gelagert und über eine Einzellast in Plattenmitte verformungsgesteuert bis auf eine maximale Durchbiegung von 30 mm belastet (Auswertung erfolgt bei 25 mm). Die Last-Verformungskurve wird kontinuierlich aufgezeichnet. Die Ergebnisse werden anschließend in einem Diagramm der absorbierten Energie als Funktion der Durchbiegung aufgetragen.

5.2 Statisch bestimmte Biegebalkenprüfungen nach EN 14488-3

Bestimmung der Biegefestigkeiten bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern:

Das verformungsgesteuerte Testverfahren bezieht sich auf einen gekerbten Balken mit einer Länge von 500 mm, einer Breite von 125 mm und einer Höhe von 75 mm, welcher aus einer zuvor gespritzten Quadratplatte herauszuschneiden ist. Der Prüfkörper wird für den Test auf 2 frei drehenden Rollen gelagert und über 2 Einzellasten, jeweils im Drittpunkt der Spannweite, verformungsgesteuert bis auf eine maximale Durchbiegung von 40 mm belastet. Die Last-Verformungskurve wird kontinuierlich aufgezeichnet.

6 Langzeitverhalten von Faserbetonen

Es ist von zentraler Bedeutung dem Langzeitverhalten von Faserbetonen, auch bei der Verwendung von Spritzbeton, Aufmerksamkeit zu widmen. Unterschiedliche Kriechversuche haben gezeigt, dass die Verwendung von Stahlfaserbeton weder zu bedenklichen Kriechverformungen noch zu einem Kriechversagen führt. Hingegen sind erhebliche Kriechverformungen bei Kunststofffaserbetonen zu erwarten, die bis zum vollständigen Kriechversagen führen. Unterschiedliche Veröffentlichungen beschreiben dieses Verhalten. Beispielsweise sei auf die Österreichische Richtlinie „Faserbeton“ [10] hin-

Energy absorption class	Absorbed energy in joules given a deflection of max. 25 mm
E500	500
E700	700
E1000	1000

Table 2: Definition of the Energy Absorption Classes

tests enables the cross-sectional bearing capacity to be determined (appropriately applied in a calculation, in which the cross-sectional bearing capacity is taken as material resistance).

In this respect both the test methods as well as the results they produce differ. As a consequence results from slab tests cannot be applied for dimensioning, if the cross-sectional bearing capacity is included on the resistance side (usual procedure for bearing structure dimensioning).

5 Test Methods for Determining the Capability

5.1 Slab Test after EN 14488-5

Determining the energy absorption for fibre-reinforced slab-shaped test specimens:

the deformation-controlled test method takes a quadratic test specimen with the dimensions 600 x 600 mm and a slab thickness of 100 mm into account (please also see Fig. 12). This is

produced under site conditions in order to take the effects of fibre orientation and fibre rebound into consideration (Fig. 2). The test specimen is set up so that it can rotate freely for the test and deformation-controlled via an individual load at the slab centre and a load applied up to a maximum deflection of 30 mm (evaluation takes place at 25 mm). The load-deformation curve is recorded continuously. Subsequently the results are displayed in a diagram of the absorbed energy as a function of the deflection.

5.2 Statically defined Bending Beam Tests after EN 14488-3

Determining the bending strengths for fibre-reinforced slab-shaped test specimens:

the deformation-controlled test method relates to a notched beam 500 mm in length, 125 mm wide and 75 mm high, which is cut from a previously sprayed quadratic slab. The test specimen is set on 2 freely rotating rollers for the test and



Herstellung eines Prüfkörpers aus Stahlfaserspritzbeton (im Hintergrund sind die Schalungsformen erkennbar)

Production of a steel fibre shotcrete test specimen (the formwork units can be seen in the background)



Kriechversuchsstand

Creep test stand

gewiesen, in deren Anhang die Ergebnisse der Kriechversuche hinterlegt wurden. Die meisten Kriechversuche wurden anhand von balkenförmigen Prüfkörpern durchgeführt.

Untersuchungen des Langzeitverhaltens an plattenartigen Versuchskörpern mit Abmessungen gemäß EN 14488-5 [4] führten zu analogen Ergebnissen hinsichtlich der Kriechneigung von Kunststoffaserbetonen (Bild 3). Das Lastniveau für die Langzeitversuche wurde mit lediglich 60 % der sich aus den Kurzzeitversuchen resultierenden aufnehmbaren Last festgelegt und dennoch konnte nach relativ kurzer Zeit unter Variation realer Temperaturunterschiede die Kriechneigung der Kunststoffaserbetone beobachtet werden (Bild 4).

7 Referenzprojekte

Zahlreiche Tunnelprojekte wurden weltweit in den letzten Jahren unter Verwendung von Stahlfaserspritzbeton realisiert. Drei Referenzobjekte werden nachfolgend vorgestellt.

7.1 Gotthard-Basistunnel

Mit dem 57 km langen Gotthard-Basistunnel entsteht der längste Eisenbahntunnel der Welt. Er ist das Herzstück einer

Flachbahn durch die Alpen. Bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt, im Oktober 2001, hat Bekaert (Schweiz) AG die Projektbearbeitung aufgenommen, die zu einem erfolgreichen Spritzbetonkonzept mit Dramix® Stahldrahtfasern und Duomix® PP führte. Um die Bauzeit zu verkürzen, wurde die gesamte Tunnelstrecke in 5 Abschnitte mit 3 Zwischenangriffen (Amsteg, Sedrun, Faido) unterteilt. Der Einsatz von Stahlfaserspritzbeton wurde auf die Abschnitte mit geplantem Sprengvortrieb konzentriert. Hier bestand die

deformation-controlled via 2 individual loads, each at the third points on the span width, and a load applied up to a maximum deflection of 40 mm. The load-deformation curve is recorded continuously.

6 Long-term Behaviour of Fibre Concretes

It is essential to observe the long-term behaviour of fibre concretes also when shotcrete is applied. Various creep tests have shown that the application of steel fibre concrete neither leads to substantial creep deformations nor to creep failure. On the other hand substantial creep deformations can be expected from plastic fibre concretes. Different publications describe this behaviour. For example a reference is made to the Austrian Guideline on "Fibre Concrete" [10], whose appendix contains results of creep tests. Most creep tests were executed on the basis of beam-shaped test specimens.

Investigations of the long-term behaviour on slab-shaped test specimens with dimensions

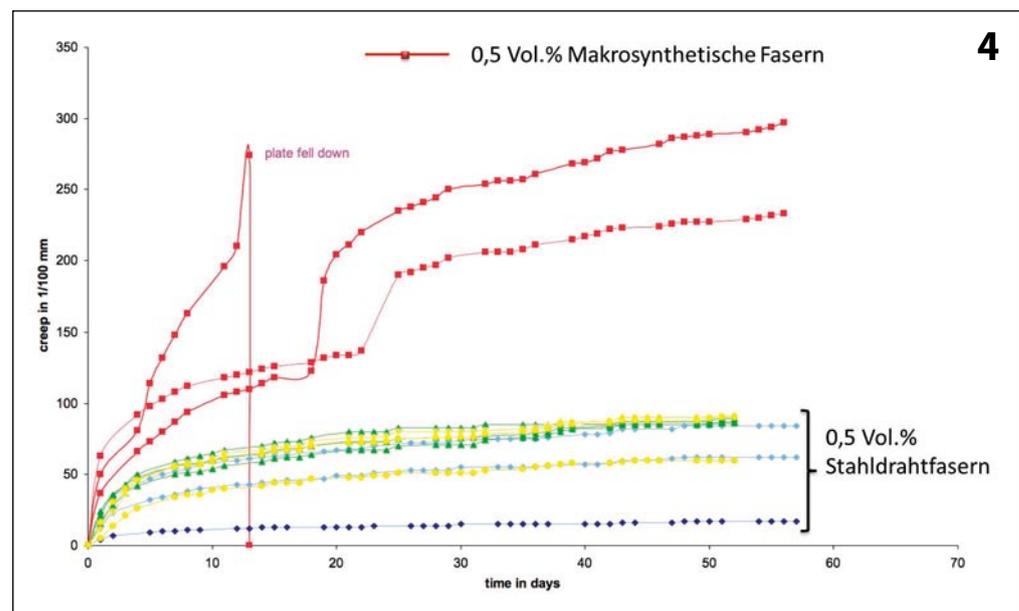
in keeping with EN 14488-5 [4] led to similar results regarding the tendency of plastic fibre concretes to creep (Fig. 3). The load level for the long-term tests was set at only 60 % of the acceptable load derived from the short-term tests and notwithstanding the inclination of the plastic fibre concretes to creep was observed after a relatively short time with varied real temperature differences (Fig. 4).

7 Reference Projects

Numerous tunnel projects have been accomplished in the course of recent years using steel fibre shotcrete. Three reference projects are now presented.

7.1 Gotthard Base Tunnel

The world's longest railway tunnel is being created in the shape of the 57 km long Gotthard Base Tunnel. It represents the core of a flat trajectory railway through the Alps. Bekaert (Schweiz) AG took up the project planning at a relatively early point in time – October 2001 – leading to a successful shotcrete concept with Dramix®, steel wire



Kriechverhalten unter Langzeitbelastung von Stahl- und Kunststoffasern (X-Achse: Tage / Y-Achse: Verformungen)

Creep behaviour under long-term load of steel and plastic fibres (X-axis: days/ Y-axis: deformations)



Tagbautunnel Erstfeld, Brandschutzbeton Duomix® M6
Erstfeld cut-and-cover tunnel: fire protection concrete Dramix® M6

Möglichkeit, Stahlfaserspritzbeton effektiv für die Felssicherungsarbeiten einzusetzen.

Erstfeld: Strabag (Schweiz) AG
Hier befindet sich das nördliche Portal des Tunnels. Neben den Außenanlagen besteht der 7,6 km lange Teilabschnitt (TBM-Vortrieb Herrenknecht) aus 2 parallelen Einspur-Tunnelröhren. Die ersten 600 m wurden in einer offenen Baugrube erstellt (Tagbautunnel). Der Tagbautunnel mit einem Volumen von 40.000 m³ Brandschutzbeton wird mit Duomix M6 verstärkt, dessen Zudosierung über den Einsatz Incite MD400 erfolgte. Das Tunnelbauunternehmen Strabag (Schweiz) AG führte zusätzlich im Sprengvortrieb die Abzweigungsbauwerke für den Weiterausbau „Gotthard lang“ aus. Für die Felssicherung wurde Dramix RC-65/35-BN für die Stahlfaserspritzbetonmischung eingesetzt. (Bild 5).

Amsteg: Strabag (Schweiz) AG
Der Zufahrtstunnel von 2 km Länge wurde im Sprengvortrieb ausgeführt, Felssicherung mittels Dramix RC-65/35-BN. Ab dem Fußpunkt Amsteg wird der TBM-Vortrieb Herrenknecht, von beiden Tunnelröhren, rd. 12 km Richtung Süden, bis zur

Teilabschnittsgrenze Sedrun geführt.

Sedrun: Arge Transco Sedrun (Implenia CH, Frutiger CH, Bilfinger Berger D, Pizzarotti I)
Vom Zwischenangriff Sedrun aus wurden die geologisch schwierigen Zonen in Richtung Norden und Süden (Gesamtlänge 6,2 und 3 km Loserweiterung) im Sprengvortrieb durchfahren (Bild 6). Vor Vertragsunterzeichnung für die Lieferungen der Stahlfasern hat sich die federführende Leitung Arge Transco Sedrun über die Leistungsfähigkeit und Produktionsmöglichkeiten (Liefersicherheit) überzeugt. Die Forderung der Lieferung von Stahlfasern per Bahn auf die Baustelle konnte erfüllt werden (Bild 7). Die Zusammenarbeit von Arge, Holcim (Schweiz) AG und Bekaert (Schweiz) AG ermöglichte es, die Stahlfasern im Zementwerk von Holcim Untervaz auf die Schmalspurbahn der RhB (Rhätische Bahn) umzuladen. Der Transport erfolgte jeweils zusammen mit dem Zementzug nach Sedrun auf den Hauptinstallationsplatz. Allein für den Abschnitt Los Sedrun wurden pro Jahr über 1.000 t Stahldrahtfasern der (geklebte Fasertypen, Anlieferung in Big



Ortsbrustsicherung mit Dramix® Stahlfaserspritzbeton
Securing the face with Dramix® steel fibre shotcrete

fibres and Duomix® PP. The entire tunnel route was split up into 5 sections with 3 intermediate points of attack (Amsteg, Sedrun and Faido) in order to reduce the construction time. The application of steel fibre shotcrete was concentrated on the sections where drill+blast drives were planned. Here it was possible to apply steel fibre shotcrete effectively for the rock supporting activities.

Erstfeld: Strabag (Schweiz) AG
The tunnel's north portal is located here. Apart from the outside facilities the 7.6 km long part-section (Herrenknecht TBM drive) comprises 2 parallel single-track tunnel bores. The first 600 m was tackled by cut-and-cover. The cut-and-cover tunnel with a volume of 40,000 m³ fire protection concrete is reinforced with Duomix M6, which was added through applying Incite MD400. The tunnelling contractor Strabag (Schweiz) AG also undertook the branching structures for further development "Gotthard lang" by drill+blast. Dramix RC-65/35-BN was used for the steel fibre shotcrete mix (Fig. 5).

Amsteg: Strabag (Schweiz) AG
The 2 km long access tunnel was tackled via drill+blast, the rock secured by Dramix RC-65/25-BN.

The Herrenknecht TBM drive for the 2 tunnel bores is executed some 12 km towards the south until the Sedrun part-section boundary from the Amsteg bottom point.

Sedrun: Transco Sedrun JV (Implenia CH, Frutiger CH, Bilfinger Berger D, Pizzarotti I)

The geologically tricky zones towards the north and south (total length 6.2 km and a 3 km long extension of the section) were driven from the Sedrun intermediate point of attack via drill+blast (Fig. 6). Prior to the signing of the contract for supplying the steel fibres the responsible contractor Transco Sedrun JV checked the capabilities and production facilities (secure delivery). The demand to supply the steel fibres by rail to the site was successfully accomplished (Fig. 7). Collaboration between the JV, Holcim (Schweiz) AG and Bekaert (Schweiz) AG made it possible to transload the steel fibres in the Holcim Untervaz's cement plant on to the narrow-gauge track of the RhB (Rhaetian Railway). In each case transportation took place together with the cement train to Sedrun arriving at the main installation yard. For the Sedrun section alone more than 1,000 t of steel wire fibres glued

Bags zu 1.100 kg, CE Label, System 1) für Stahlfaserspritzbeton verarbeitet. Die gesamte Beton- und Stahlfaserspritzbetonproduktion erfolgte durch Arge Transco, in der Doubrava Betonzentrale mit 2 Dosieranlagen DE Incite SF 500 (1 Anlage Dramix® Stahlfasern, 1 Duomix® M6 PP Fasern) (Bild 8). Für die im Sprengvortrieb eingesetzten Stahlfaserspritzbetone wurde u.a. die Anforderung einer absolut igelfreien Rezeptur verlangt und durchgesetzt. Dazu haben sich die eingesetzten, geklebten Dramix® Stahlfasertypen bewährt. Die Förderung und Dosierung mit den automatischen Dosieranlagen haben sich über die lange Bauzeit mit der eingesetzten Stahlfaser in Big Bags zu 1.100 kg als zuverlässigen Systementscheid erwiesen. Mit diesem Einsatz konnten die großen Volumen für Erstsicherungsarbeiten und Ortsbrustsicherungen sicher- und zeitgerecht bewältigt werden (Tabelle 3).

Faido: Arge TAT (Implenia CH, Alpine A, CSC Impresa SA I, Hochtief D, Impregilo)
Der südliche Zwischenangriff Faido umfasst einen 2,7 km langen Schrägstollen mit rd. 12 % Gefälle, um das Niveau der künftigen Tunnelröhren zu erreichen. Hier befindet sich auch die zweite Multifunktionsstelle (Bild 9). Von dieser aus wurden die beiden Tunnelröhren 15 km Richtung Sedrun im Norden mit TBM Herrenknecht vorgetrieben. Für die Felssicherungsarbeiten wurden im Zugangsstollen und in der Multifunktionsstelle Dramix® Stahlfasern eingesetzt. Die Stahlfaserspritzbetonproduktion erfolgte durch Holcim/Sika.

Länge des gesamten Tunnel- und Stollensystems	[km]	151.80
Ausbruch Sprengvortrieb	[km (%)]	66.30 (43,7)
Abschlagslängen	[m]	0.8 bis 4.0
Spitzenleistung	[m/Arbeitstag]	11.5
Durchschnittsleistung günstige Geologie	[m/Arbeitstag]	3.0 bis 4.5
Durchschnittsleistung ungünstige Geologie	[m/Arbeitstag]	1.0
Vortrieb Tunnelbohrmaschine (Herrenknecht)		
Ausbruch TBM	[km (%)]	85.5 (56.3)
Durchschnitt Erstfeld	[m/Arbeitstag]	14
Spitzenleistung Erstfeld	[m/Arbeitstag]	56.0
Gewicht der TBM Erstfeld	[t]	3000
Materialbewirtschaftung		
Gesamtmenge des ausgebrochenen Materials	[Mio. t]	25
Beton	[Mio. m ³]	2.3
Bekaert Stahlfasern	[t]	8.800
Bekaert Duomix M6	[t]	105

Tabelle 3: Projektkennzahlen Rohbau Gotthard-Basistunnel
(Quelle: Medienstelle Alp Transit, 7.9.09)

Bodio: Arge TAT (Implenia CH, Alpine A, CSC Impresa SA I, Hochtief D, Impregilo)

Mit einem Umgehungsstollen wurde eine bautechnische Lockergesteinsstrecke umfahren, damit eine schnellere Erschließung der unterirdischen Montagekaverne für die Tunnelbohrmaschine Herrenknecht ermöglicht wurde. Die Sohlenplatte Umgehungsstollen und Sicherungsspritzbeton mit Dramix® Stahlfasern und Duomix® M6 PP Fasern. Mit TBM-Vortrieb Herrenknecht wurden ab Bodio 13 km vorgetrieben.

fibres types, delivered in big bags of 1,100 kg, CE Label, System 1) were processed for steel fibre shotcrete per year. The entire concrete and steel fibre shotcrete production was undertaken by the Transco JV in the Doubrava concrete plant with 2 dosing units DE Incite SF 500 (1 unit Dramix® steel fibres, 1 Duomix® M6 PP fibres) (Fig. 6). For the steel fibre shotcretes used for drill+blast activities among other things the demand for a recipe absolutely free of clumps was called for and successful achieved. Towards this end the Dramix® glued steel fibre types

that were used proved their worth. The decision to supply the steel fibres in 1,100 kg big bags and apply the automatic dosing system over the protracted construction period turned out to be the right one. In this manner the huge volumes required for initial supporting operations and securing the face were tackled safely and as scheduled (Table 3).

Faido: TAT JV (Implenia CH, Alpine A, CSC Impresa SA I, Hochtief D, Impregilo)

The Faido southern intermediate point of attack embraces a 2.7 km long inclined tunnel with roughly 12 % gradient devised to reach the level of the future tunnel bores. The second Multi Function Station is also located here (Fig. 9). From this point the 2 main tunnel bores were driven with a Herrenknecht TBM 15 km towards Sedrun in the north. Dramix® steel fibres were applied for the rock securing operations in the access tunnel and the Multi Function Station. Holcim/Sika undertook the production of the steel fibre shotcrete.



Anlieferung der Stahldrahtfasern per Bahn
Delivering the steel wire fibres by rail

Length of entire tunnel and gallery system	[km]	151.80
Excavation drill+blast	[km (%)]	66.30 (43,7)
Lengths of advance	[m]	0.8 to 4.0
Peak rate	[m/working day]	11.5
Average rate in favourable geology	[m/working day]	3.0 to 4.5
Average rate unfavourable geology	[m/working day]	1.0
TBM drive (Herrenknecht)		
TBM excavation	[km (%)]	85.5 (56.3)
Average Erstfeld	[m/working day]	14
Peak rate Erstfeld	[m/working day]	56.0
TBM weight Erstfeld	[t]	3000
Material management		
Total amount of excavated material	[m. t]	25
Concrete	[m. m ³]	2.3
Bekaert steel fibres	[t]	8.800
Bekaert Duomix M6	[t]	105

Table 3: Project Key Figures for Roughwork – Gotthard Base Tunnel
(Quelle: Medienstelle Alp Transit, 7.9.09)

7.2 Tunnel Eyholz

Die Umfahrung Visp stellt ein rd. 8 km langes Teilstück der Nationalstraße A9 im Kanton Wallis dar. Visp wird im Süden in den 2 insgesamt ca. 7,5 km langen Tunnel Visp und Eyholz umfahren. Für jeden der Tunnel werden 2 Röhren erstellt, zwischen den beiden Tunneln wird die A9 im Vispental über die in den Jahren 2004 bis 2006 erstellten Staldbach-Brücken geführt. Zur Herstellung der Halbanstschlüsse vom und ins Vispental werden in den beiden Tunneln insgesamt 5 unterirdische Verzweigungen, im Tunnel Eyholz ein Ein- und Ausfahrtstunnel sowie im Tunnel Visp ein Überwurfstunnel, erstellt.

Der Tunnel Eyholz bildet den östlichen Teil der Umfahrung Visp und besteht aus einer Nord- und Südröhre, mit jeweils einer Länge von 4,2 km (Bild 10). Die Arge Haupttunnel Eyholz unter der Federführung der Frutiger AG Tunnelbau Thun führt die Projektarbeit. Das gesamte Projekt wird im Sprengvortrieb ausgeführt. Der Durchstich ist auf Anfang 2012 vorgesehen.

Die geologischen Verhältnisse in den beiden Tunneln sind im Wesentlichen gut aufgeschlossen. Im Tunnel Eyholz wurde vorgängig ein Sondierstollen entlang der Tunnelachse erstellt. Auf der Ostseite des Tunnels Eyholz wird der Bergsturz sowie darüber liegender Bachschutt durchörtert. Nach rd. 500 m und einem schleifenden Übergang vom Lockergestein liegen die beiden Tunnelröhren vollständig im Fels. Im Bereich Staldbach des Tunnels Eyholz wurden die geologischen Verhältnisse mit zahlreichen Sondierbohrungen erkundet, um die dort vorhandene Lockergesteinsübertiefung und eine Zone mit ungünstigen Gebirgseigenschaften (Graphitzone) mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen und die Vortriebe entsprechend darauf abzustimmen.

Mit der Umfahrung Visp Süd ist die Bauausführung eines Großprojekts im Gange, dass bezüglich Tunnelvortrieb eine Vielzahl unterschiedlicher und anspruchsvoller Ingenieur- und Unternehme-

Bodio: TAT JV (Implema CH, Alpine A, CSC Impresa SA I, Hochtief S, Impregilo)

A section of soft ground was detoured with a by-pass tunnel in order to enable the underground assembly chamber for the Herrenknecht TBM to be set up more speedily. For the base of the bypass tunnel and the supporting shotcrete with Dramix® steel fibres and Duomix® M6 PP fibres were applied. 13 km was driven with the Herrenknecht TBM from Bodio.

7.2 Eyholz Tunnel

The Visp bypass represents a roughly 8 km long part-section



Automatische Förderung und Dosierung mit Incite DE SF 500, Dramix Stahldrahtfasern und Duomix M6

Automatic transport and dosing with Incite DE SF 500, Dramix steel wire fibres and Duomix M6

of the A9 national highway in the Canton of Valais. Visp is bypassed in the south by 2 altogether roughly 7.5 km long tunnels Visp and Eyholz. Both tunnels each possess 2 bores, the A9 in the Visper Valley runs over the Staldbach bridge built between 2004 and 2006. To produce the links from and into the Vispental a total of 5 underground forks, an access and exit tunnel in the Eyholz Tunnel as well as a refurbished section tunnel in the Visp Tunnel must be produced.

The Eyholz Tunnel forms the eastern part of the Visp bypass and consists of a north and south bore each 4.2 km in length (Fig. 10) The Haupttunnel Eyholz AG JV headed by the Frutiger AG



Übersicht Multifunktionsstelle Faido

View of the Faido Multi Function Station



10 Nord- und Südröhre des Eyholz-Tunnels
North and south bores of the Eyholz Tunnel

raufgaben birgt. Zum 15. September 2011 befindet sich der Vortriebsstand in der Nordröhre bei 2.446 m und in der Südröhre bei 2.680 m. Die gesamte Beton- und Spritzbetonproduktion erfolgt in der auf dem Hauptinstallationsplatz erstellten Betonzentrale durch die Arge Eyholz. In der Betonzentrale wurde eine Förder- und Dosieranlage (Incite SF 500) für die wirtschaftliche und sichere Produktion von Stahlfaserspritzbeton installiert (Bild 11). Die Anlieferung der Stahldrahtfasern Bekaert GH 65/35 (CE Label, System 1, geklebte Stahlfasertypen) erfolgt in Big Bags zu 1.100 kg. Die verlangten Anforderungen an den Stahlfaserspritzbeton wurden unter Leitung der Arge Eyholz in enger Zusammenarbeit mit allen Beteiligten ziel führend mittels Vorversuchen erarbeitet. Das Arbeitsvermögen der ausgearbeiteten Stahldrahtfaserdosierung wurde anhand von Plattenprüfungen am Geo-Bau_Labor, Chur/CH, geprüft. Ein Energieabsorptionsvermögen von 800 Joule wurde erreicht und lag somit über dem geforderten Wert von 700 Joule (Bild 12). Der Einsatz Stahlfaserspritzbeton als Sicherheitselement für die

Felssicherung und in bestimmten Sicherheitsprofilen als Ersatz von Mattenbewehrung, hat sich im laufenden Projekt als effiziente, sichere und wirtschaftliche Lösung bestätigt.

7.3 Violay-Tunnel

Der Violay-Tunnel stellt ein rd. 3,9 km langes Teilstück der A 89 dar, die Lyon und Bordeaux miteinander verbinden. Der Violay-Tunnel kreuzt die geographische Trennungslinie zwischen der Rhone und der Loire und folgt einer praktisch geradlinigen Strecke annähernd parallel zur westlichen Achse (Cote Loire) – Est Cote Rhone. Der Tunnel besteht aus 2 Verkehrsröhren (Bild 13). Die geologischen Vorkommnisse weisen auf recht altertümliches

Versuchsanordnung der Plattenprüfung gemäß SIA 162/6

Test set-up for the slab test according to SIA 162/6



12



11 Geklebte Stahldrahtfasern für hohe Dosiergenauigkeit und -geschwindigkeiten
Glued steel wire fibres for exact dosage and high dosing speeds

Tunnelbau Thun is responsible for working out the project. The entire project is being tackled via drill+blast. The breakthrough is foreseen for early 2012.

The geological conditions in both tunnels are by and large well explored. In the Eyholz Tunnel an exploratory heading was produced in advance along the tunnel axis. On the Eyholz Tunnel's east side a rockslide as well as debris located above it must be penetrated. After some 500 m and a looping transition to the soft ground the 2 tunnel bores are located completely in rock. In the Eyholz Tunnel's Staldbach area the geological conditions were investigated with numerous exploratory drillholes in order to determine the soft ground overdeepening and a zone with unfavourable

rock properties (graphite zone) with sufficient accuracy in order to ensure that the drives were properly geared to this.

The Visp bypass constitutes the execution of a major project, which involves a large number of different and sophisticated engineering and entrepreneurial tasks relating to driving the tunnel. As of September 15, 2011 the drive had progressed to 2,446 m in the north bore and 2,680 m in the south one. The total concrete and shotcrete production is carried out at the concrete plant set up on the main installation yard by the Eyholz JV. A transport and dosing system (Incite SF 500) was installed at the concrete plant for the economic and safe production of steel fibre shotcrete (Fig. 11). The delivery of steel wire fibre GH 65/35 (CE Label, System 1, glued steel fibre type) is carried out in big bags of 1,100 kg. The requirements posed on the steel fibre shotcrete were worked out by the Eyholz JV with all those involved on the basis of advance tests. The working capacity of the steel wire fibre dosage that was worked out was tested on the basis of slab tests at the Geo-Bau Labor, Chur/CH. An energy absorption capacity of 800 joules was attained thus exceeding the demanded value of 700 joules

Material hin mit sehr unterschiedlichen Verformungseigenschaften und teils ungünstigen Gebirgseigenschaften. Aus diesem Grund wurde entschieden das Teilstück auf konventionelle Art mit geplantem Sprengvortrieb auszuführen. Ein Aufbringen der Erstsicherung mit Stahlfaserspritzbeton wurde als Hauptziel aufgenommen. Im Rahmen dieses Projekts wurden ausführliche Vorversuche durchgeführt, welche im Zusammenhang mit diesem Referenzprojekt vorrangig vorgestellt werden sollen. Für das Violay-Tunnel-Projekt wurden Anforderungen an das Energieabsorptionsvermögen nach EN 14488-5 [4] mit einem Mindest-

wert von 700 Joule definiert. Der Ausführungsvorschlag mit 25 kg/m³ Dramix® RC-65/35-BN wurde aufgenommen. Auf der Baustelle wurden 3 Probekörper gefertigt und im Anschluss nach 28 Tagen im Prüflabor „Sigma Beton Laboratory“ getestet und entsprechend ausgewertet. Anhand der nachfolgend aufgelisteten Ergebnisse lässt sich erkennen, dass jede einzelne Platte das erforderliche Energieabsorptionsvermögen von 700 Joule überschreitet (Tabelle 4, 5) (Bild 14, 15).

Zusätzliche Tests zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit wurden durchgeführt, um den Tragwerksplaner rechnerische Nachweise mittels Kenn-

(Fig. 12). The application of steel fibre shotcrete as a safety element for securing the rock and in certain supporting profiles as a substitute for mat reinforcement confirmed itself as an efficient, safe and economic solution in the course of the ongoing project.



Violay-Tunnel
Violay Tunnel

7.3 Violay Tunnel

The Viola Tunnel represents a roughly 3.9 km long part-section of the A 89, connecting Lyon and Bordeaux. The Violay Tunnel crosses the geographical line separating the Rhone and the Loire and runs over a practically straight alignment almost parallel to the western axis (Cote Loire) – Est Cote Rhone. The tunnel consists of 2 bores for traffic (Fig. 13).

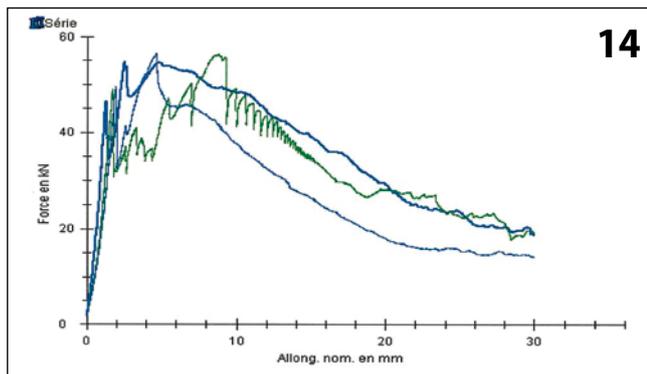
The geological conditions indicate rather ancient material with extremely different deformation characteristics and in part, rock properties. For this reason it was decided to execute the part-section conventionally with a planned drill+blast operation. One of the main targets was to undertake initial supporting with

Verformung / Last	Platte 1 [KN]	Platte 2 [KN]	Platte 3 [KN]
Maximalwert [mm]	55	56,4	56,6
5	54,6	42,6	48,5
15	39,1	34,9	26,4
25	23,6	22,7	15,5

Tabelle 4:
Auswertung der einzelnen Probepplatten

Deformation / load	Slab 1 [KN]	Slab 2 [KN]	Slab 3 [KN]
Max. value [mm]	55	56,4	56,6
5	54,6	42,6	48,5
15	39,1	34,9	26,4
25	23,6	22,7	15,5

Table 4:
Evaluation of the individual Sample Slabs



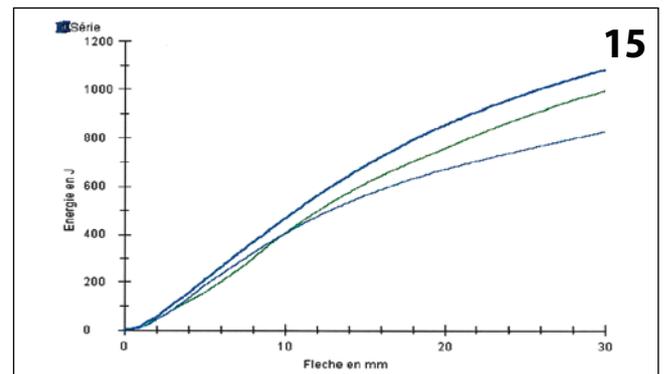
Last-Verformungsdiagramm zu Tabelle 4
Load-deformation curve pertaining to Table 4

Verformung / Energieabsorption	Platte 1 [Joule]	Platte 2 [Joule]	Platte 3 [Joule]
Maximalwert [mm]	1084,1	996,2	828,7
5	207,2	157,2	186
15	687,3	611,1	561,8
25	980,8	889,7	753,9

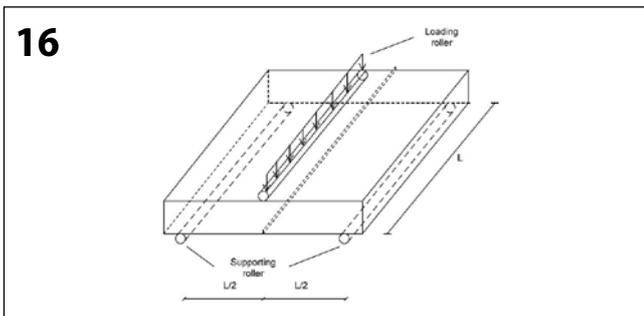
Tabelle 5:
Korrelation zum Energieabsorptionsvermögen der einzelnen Probepplatten

Deformation / energy absorption	Slab 1 [joules]	Slab 2 [joules]	Slab 3 [joules]
Max. value [mm]	1084,1	996,2	828,7
5	207,2	157,2	186
15	687,3	611,1	561,8
25	980,8	889,7	753,9

Table 5:
Correlation to the energy absorption capacity for the individual Sample Slabs



Energieabsorptionsdiagramm zu Tabelle 5
Energy absorption diagram pertaining to Table 5



Prüfkörper gemäß EFNARC Empfehlung, Juni 2011

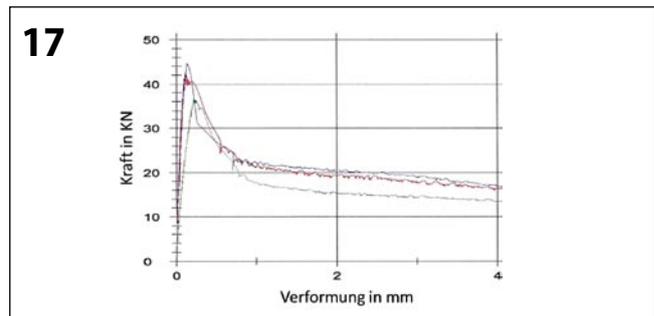
Test specimen according to EFNARC recommendation, June 2011

wert des Bauteilwiderstands zu ermöglichen. Abweichend zu den Bestimmungen der EN 14488-3 wurden, statt statisch bestimmter Balken, zweiseitig gelagerte Rechteckplatten und somit ebenfalls statisch bestimmte Prüfkörper gefertigt. Die Rechteckplatten wurden gemäß EFNARC Empfehlung [7] ausgeführt und bringen einige Vorteile im Vergleich zu den Balken gemäß EN 14488-3 mit sich (Bild 16):

- Gleiche Geometrie wie die der Platten zur Ermittlung des Energieabsorptionsvermögens
- Größere Zugzone und somit gleichmäßigere Faserverteilung und geringere Variation

- Kein Ausschneiden von Prüfkörpern aus zuvor hergestellter Platte

Die aus der Versuchsanordnung resultierenden Last-Verformungsdiagramme sind in Bild 17 dargestellt. Unabhängig wurden ebenfalls Kunststofffaserbetone in das Testprogramm mit aufgenommen. Der Entscheid fiel allerdings zu Gunsten des Stahlfaserbetons aus. Der Einsatz Stahlfaserspritzbeton für die Felssicherung und in bestimmten Sicherungsprofilen als Ersatz von Mattenbewehrung hat sich auch für dieses Projekt als effizienteste Lösung bestätigt. 



Last-Verformungsdiagramme mit 25 kg/m³ Dramix RC-65/60-BN

Load-deformation diagrams with 25 kg/m³ Dramix RC-65/60-BN

steel fibre shotcrete. Within the scope of the project extensive advance tests were carried out, which deserve particular mention in connection with this scheme. Requirements on the energy absorption capacity were defined for the Violay Tunnel project after ENN 14488-5 [4] with a minimum value of 700 joules. The proposal to undertake this with 25 kg/m³ of Dramix® RC-65/35-BN was accepted. Three sample specimens were completed on site and following 28 days tested in the "Sigma Beton Laboratory" and correspondingly evaluated. On the basis of the following results that are listed it is evident that each individual slab lies under the required energy absorption capacity of 700 joules (Table 4 + 5) (Figs. 14 + 15).

Additional tests to determine the cross-section bearing capacity were executed in order to provide the structural planners with computational proof in the form of characteristic values for the component resistance. In contrast to the specifications of the EN 14488-3, 2-sided rectangular beams were produced instead of statically defined beams thus resulting in statically defined test specimens. The rectangular slabs were produced in keeping with EFNARC recommendation [7] and provide a number of advantages as opposed to the beams according to EN 14488-3 (Fig. 16):

- The same geometry as the slabs to determine the energy absorption capacity
- Greater tensile zone and in turn more homogeneous fibre distribution and lower variation
- No cutting out test specimens from a previously produced slab.

Fig. 17 displays the load-deformation diagrams resulting from the test set-up. Plastic fibre concretes were included in the test programme as well but independently. However it was decided to plump for the steel fibre concrete. The application of steel fibre shotcrete for securing the rock and in certain supporting profiles as a substitute for mat reinforcement proved to be the most efficient solution for this project. 

Literatur / References

- [1] Bemessung von Stahlfaserbeton im Tunnelbau, B.Maidl, A.Nitschke, M. Ortu, Bochum, Juni 1999
- [2] EN 14487-1, Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität
- [3] EN 14488-3, Prüfung von Spritzbeton – Teil 3: Biegefestigkeiten (Erst- und Restfestigkeit) faserverstärkter balkenförmiger Betonprüfkörper
- [4] EN 14488-5, Prüfung von Spritzbeton – Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern
- [5] EN 14651, Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)
- [6] EN 14889-1, Fasern für den Beton – Teil 1, Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität
- [7] EFNARC, Three point bending test on a square panel with notch, Flexural tensile strength of fibre concrete on sprayed test specimen, June 2011
- [8] Model Code 2010, First complete draft, Volume 1, bulletin 55
- [9] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, „Richtlinie Faserbeton“ Fassung Juli 2008
- [10] SIA 162/6: 1999 Empfehlung Stahlfaserbeton
- [11] De Rivaz Benoit, Violay Tunnel- Steel fibre reinforced spray concrete for compliance with site safety requirement
- [12] D. Hansel, P.Guirguis, Stahlfaserbetontübbing: Stand der Technik und realisierte Projekte, Tunnel 1/2011
- [13] Alex Schneider, Bruno Saller: Anspruchsvoller Tunnelbau in Lockergestein und Fels, Tunnelbau-Schweizer Bau Journal – SBJ 2/09