

Stahlfaserbeton-Tübbinge: Stand der Technik und realisierte Projekte

Stahlfaserbeton findet im Tunnelbau ein weites Einsatzfeld. Der folgende Beitrag ist ein Vortrag, der auf den 2. Herrenknecht Formwork Technology Days Anfang März 2011 gehalten wurde. Er gibt den derzeitigen Stand der Technik bei der Verwendung von Stahlfaserbeton für Tübbinge wieder und zeigt einige Einsatzbeispiele auf.

1 Einführung

In den 1970er Jahren erstmalig in den europäischen Markt eingeführt, lagen für den Baustoff „Stahlfaserbeton“ weder Normen noch Richtlinien zur Bemessung vor. Anfänglich wurde Stahlfaserbeton als Ersatz konstruktiver Bewehrung oder in der Kombination mit herkömmlichem Betonstahl eingesetzt um den Gebrauchszustand von Bauteilen positiv zu beeinflussen. Nach gewonnener Erfahrung mit diesem Baustoff wurden national und international für vielseitige Anwendungsgebiete bedeutende Schritte auf dem Normengebiet eingeleitet, um fundierte Hilfsmittel zur Bemessung, Prüfung, Herstellung und Ausführung von Stahlfaserbeton bereitzustellen.

Im Tunnelbau findet Stahlfaserbeton ein hervorragendes Einsatzgebiet. Die häufig vorhandene Schnittgrößenkombination aus hohen Drucknormalkräften und relativ geringen Biegemomenten einer Tunnelschale lässt sich

Dieter Hansel, Bekaert GmbH, Verkaufsleiter Bauprodukte EMEA, Rheda-Wiedenbrück, Germany

Dipl.-Ing. Philipp Guirguis, Bekaert GmbH, Technischer Leiter Bauprodukte, Friedrichsdorf, Germany
www.bekaert.com/building

vorwiegend mit den Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons allein bewältigen. Der Materialwiderstand gegen konzentrierte Lasteinleitungen sorgt für einen deutlich geringen Wartungsaufwand. Der Einsatz dieses Werkstoffes führt zu bauverfahrenstechnischen Vorzügen und zur Beschleunigung des Bauablaufs. Die Bereitschaft für den Einsatz von Stahlfaserbeton im Tunnelbau steigt mit der Flexibilität, die die Verwendung des Baustoffes ermöglicht und den Kosten, die gegenüber einer herkömmlichen Konstruktionslösung aus Stahlbeton eingespart werden. Im Vergleich zu internationalen Aktivitäten liegen in Deutschland viel zu selten Referenzprojekte mit Stahlfaserbeton als dauerhaft tragende Sicherung vor. Technologisch ist dies völlig unbegründet, da sowohl theoretische als auch praktische

Steel-fibre-reinforced segmental linings: State-of-the-art and completed projects

Steel-fibre-reinforced concrete is a material widely used in tunnel engineering. The following article is to presented as a paper at the Second Herrenknecht Formwork Technology Days in early March, 2011. It examines the current state-of-the-art in the use of steel-fibre-reinforced concrete for segmental linings and outlines a number of practical examples.

1 Introduction

Upon the appearance of steel-fibre-reinforced concrete on the European market in the 1970s, neither standards nor guidelines for the design and dimensioning of this new material were available. Steel-fibre-reinforced concrete was initially used as a substitute for nominal reinforcement or in combination with conventional reinforcing steel, in order to enhance the serviceability of concrete structures. Once experience with this building material had been gained, significant progress was made in terms of codes and guidelines, both nationally and internationally, and for a large range of diverse applications, in order to provide well-founded aids for the design, testing, production and installation of steel-fibre-reinforced concrete.

Steel-fibre-reinforced concrete finds one of its most pro-

minent applications in tunnel construction. The frequently encountered stress-resultant combination of high compressive forces and relatively low bending moments in a tunnel lining can predominantly be matched by using the material properties of steel-fibre-reinforced concrete only. The material's resistance against concentrated loads assures a remarkably low maintenance costs. The use of this material simplifies the construction process and accelerates the speed of execution. Interest in the use of steel-fibre-reinforced concrete in tunnel construction is rising as a result of the flexibility which the use of this material permits and the cost-savings achieved compared to the use of conventional reinforced-concrete solutions. Assessment at international level indicates that reference projects using steel-fibre-reinforced concrete as a permanent load-bearing support element remain far too rare in Germany. There is no technological justification for this omission, in view of the

Erfahrungen vorliegen. Mit der Einführung der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [2] liegt zukünftig in Deutschland ein umfangreiches Regelwerk mit Normencharakter vor.

2 Vorzüge und Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons

Stahldrahtfasern werden dem Beton zugemischt, um - neben einer Traglasterrhöhung - die mechanischen Eigenschaften auf bestimmten Gebieten 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 drei Raumrichtungen.

Der Ersatz herkömmlicher Bewehrung durch Stahlfasern bietet Kosteneinsparungspotenziale bei den Bewehrungsarbeiten (Anfertigung, Lagerung, Einbau der Bewehrungskörbe) und erhöht die Flexibilität, z.B. bei Planungsänderungen.

3 Einsatzbereiche von Stahlfaserbeton im Tunnelbau

Die Einsatzmöglichkeiten von Stahlfaserbeton im Tunnelbau sind vielfältig. Hieraus resultiert auch die Vielzahl existierender Anwendungsvarianten. Zunächst gilt die Betrachtungsweise des angewandten Tunnelbauverfahrens, indem zwischen der Spritzbetonbauweise und

dem maschinellen Tunnelbau unterschieden wird. Ferner ist eine Gliederung der verwendeten Konstruktion möglich, durch Differenzierung zwischen der einschaligen und zweischaligen Bauweise. Stahlfaserbeton findet in allen vorgenannten Varianten seinen Einsatz.

Bei Verwendung von Stahlfaserspritzbeton werden die Stahlfasern der Ausgangsmischung des Spritzbetons beigemischt. Im Spritzbetonverfahren dominiert der entscheidende Vorteil des Verzichtes auf den Arbeitsschritt „Einbau der Bewehrung“. Nicht nur die Bauzeit wird verkürzt, sondern auch die frühzeitige Aktivierung der Erstsicherung des Gebirges, besonders wichtig unter geologisch schwierigen Bedingungen, wird sichergestellt. Durch das schnelle Auffahren der Erstsicherung und der hohen Grünstandfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons werden Gebirgsauflockerungen vermindert, damit einhergehend der Gebirgsdruck reduziert, und ein bedeutend günstigerer Spannungszustand wird erzielt.

Im maschinellen Tunnelbau werden in der Regel Tübbinge eingesetzt, die im Werk gefertigt und an den Einbauort transportiert werden. Hinter der Schildmaschine werden diese als Sicherung eingebaut und ergeben einen geschlossenen Kreisring, der bei einschaliger Auskleidung auch nicht weiter ergänzt wird. Belastungszustände infolge Ausschalen (Bild 1), Lagerung und Transport lassen sich mit dem Werkstoff Stahlfaserbeton in der Regel ohne weitere Zusatzbewehrung bemessen. Die Biegespannungen sind in der Regel gering. Der Vorteil, der sich bereits hier bei der Verwendung von Stahlfaser-

beton zeigt, ist die Tatsache, dass sowohl theoretische als auch praktische Erfahrung zur Verfügung stehen. Mit der Einführung der deutschen Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [2] durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) ist ein umfassendes Regelwerk mit dem Charakter eines Standards in Deutschland zu erwarten.

2 The advantages and materials properties of steel-fibre-reinforced concrete

Steel fibres are mixed into the concrete in order not only to achieve an increase in load-bearing capacity, but also to improve mechanical properties in specific areas. Decisive properties which are significantly improved by the addition of steel wire fibres include:

- Ductility in tension and in compression
- Impact resistance
- Fatigue resistance
- High resistance against spalling
- Durability
- Low crack widths under service conditions
- Flexural strength in all three directions.

The replacement of conventional reinforcement by steel fibres also assures cost-savings potentials for reinforcement work (production, storage and installation of the reinforcement cages) and enhances flexibility in case, for example, of project modifications.

3 Applications for steel-fibre-reinforced concrete in tunnel engineering

The potential uses for steel-fibre-reinforced concrete in tunnel construction are many and di-



Belastungszustand eines Tübbings durch Ausschalen

Load state of a segmental lining caused by removal from the formwork

verse. This, naturally, is also the reason behind the large number of existing application variants. Tunnel-construction methodology, which now differentiates between shotcreting and mechanised tunnelling, should firstly be examined. Further more it can be distinguished between single-shell and double-shell types, Steel-fibre-reinforced concrete is used in all these variants.

In the case of steel-fibre-reinforced concrete for shotcrete, the steel fibres are added to the basic shotcrete concrete mix. The decisive advantage of the ability to omit the „installation of reinforcement“ operation is the predominant benefit of the shotcrete method. Not only is completion time foreshortened, early activation of initial ground support - a factor particularly critical under difficult geological conditions - is also assured. Early application of the initial support, combined with the strength of



2
Typische Bewehrungsarbeiten bei herkömmlich bewehrten Tübbingen
Typical reinforcement work for conventionally reinforced lining segments



3
Typische Verlegearbeiten bei herkömmlich bewehrten Tübbingen
Typical installation work using conventionally reinforced lining segments

serbeton ergibt, ist ersichtlich. Es entstehen keine Kosten infolge Vorhalten und Lagerung der Bewehrungskörbe, Bewehrungsarbeiten entfallen und der Ausführungsprozess wird beschleunigt (Bild 2, 3).

Fugen stellen ganz besonders kritische Bereiche dar. Infolge Transport und während des Einbaus treten häufig Abplatzungen auf, die bei Verwendung einer entsprechenden Betonstahlbewehrung, durch Einhaltung der Betondeckung, nicht verhindert werden (Bild 4). Führen Abplatzungen zu einer Wasserwegigkeit wird die Gebrauchstauglichkeit beeinträchtigt. Der Vorteil von Stahlfaserbeton-Tübbingen gegenüber

konventionell bewehrtem Beton sind die mit Stahlfasern durchsetzten und vernadelten, sonst so gefährdeten, Eck- und Kantenbereiche. Ist die Tragfähigkeit durch die Stahlfasern allein gesichert, kann komplett auf konventionelle Bewehrung verzichtet werden. Im Brandfall führen die Stahlfasern dazu, dass keine Oberflächenschichten abfallen. Bei einer Kombinationsbewehrung zum Beispiel wäre die Betonstahlbewehrung besser geschützt.

4 Wirkungsweise und Tragwirkung im Tübbing

Eine wesentliche Eigenschaft des Stahlfaserbetons ist sein duktiler Materialverhalten und seine Fähigkeit, im gerissenen Zustand eine Kraftübertragung über den Riss hinweg sicherzustellen. Von besonderer Bedeutung ist, dass Stahlfaserbeton mit üblichen Fasergehalten einer unterkritischen Bewehrung entspricht. Seine Anwendung findet er daher vorwiegend in Bauteilen, die eine Schnittkraftumlagerung und damit Mehrfachrissbildung zulassen (statisch unbestimmte Bauteile).

Tunnel sind in hohem Maße statisch unbestimmte Systeme. Die Belastungskombination aus

steel-fibre-reinforced concrete at young age, reduces ground disintegration phenomena and, as a corollary, also overburden pressure, achieving a significantly better stress state.

Factory-produced segmental lining transported to the site are generally used in mechanised tunnel construction. These segments are installed as support behind the shield machine and produce a closed annular ring which, in the case of single-shell lining, is also not further supplemented. Using steel-fibre-reinforced concrete, load states resulting from formwork removal (Figure 1), storage and transportation can generally be taken up without any additional reinforcement. The bending stresses occurring are generally low. The advantage of the use of steel-fibre-reinforced concrete here is already obviously; there are no costs resulting from the provision and storage of reinforcement cages, no reinforcement work is necessary, and the entire working process is thus accelerated (Figures 2 and 3).

Joints are particularly critical points. Spalling phenomena are caused by transportation and mainly by installation, and can-

not be prevented when traditional reinforcement is used as a certain concrete cover needs to be provided to protect from corrosion risks (Figure 4). Serviceability is negatively affected if such spalling results in water-permeability. The advantage of steel-fibre-reinforced concrete segments over conventional reinforced concrete is that fibres are dispersed all over the section and hence the concrete is also there needed where those critical corner and edge zones are to be found. Conventional reinforcement can be omitted entirely in cases in which load-bearing capacity is assured by the steel fibres alone. If a fire occurs, the steel fibres prevent the peeling off of surface layers. And, in case of combination reinforcement, for example, the rebar reinforcement is better protected.

4 Effectiveness in segmental linings

Essential properties of steel-fibre-reinforced concrete are its ductile material behaviour and its ability, in case of cracking, to assure load transfer across the crack. Of particular importance is the fact that steel-fibre-reinforced concrete with usual fibre



4
Konzentrierte Lasteinleitung durch TBM
Concentrated load caused by a TBM

Biegemoment und Drucknormalkraft ist für die Bemessung im Endzustand ausschlaggebend. Je steifer die Systeme, desto anziehender wirken sie auf Biegemomente. Je höher die auftretenden Momente, desto höher der erforderliche Bewehrungsgrad. Biegeweiche Systeme hingegen tragen die Belastung vorwiegend durch Normalkräfte ab. Die Forderung nach biegeweichen Systemen im modernen Tunnelbau findet somit ihre Begründung. Im Gegensatz zu steifen Systemen erfolgt durch die Verformung der Schale eine verstärkte Aktivierung der Eigentragswirkung des Gebirges. Die von der Sicherung (Tübbingringe) aufzunehmenden Kräfte sind daher bei duktilen Systemen geringer. Die Materialeigenschaften des Stahlfaserbetons eignen sich auf zweifache Weise um der geforderten Tragfähigkeit zu entsprechen:

1. Erhöhung der Querschnittstragfähigkeit

Stahlfaserbeton ist in der Lage, rechnerisch ansetzbare Kräfte im gerissenen Zustand zu übertragen. Im Vergleich zu unbewehrtem Beton (rechnerischer Ansatz von Zugkräften nicht erlaubt) führt dies in biegebeanspruchten Bauteilen mit Normalkräften zu einer deutlichen Traglasterrhöhung. In vielen Fällen ist die Traglast hinreichend, um eine sonst erforderliche Bewehrung komplett zu ersetzen.

2. Erhöhung der Systemtragfähigkeit

Das duktile Materialverhalten ermöglicht nach Überschreitung der Erstrisslast eine Kraftübertragung in andere Querschnittsteile; die Schnitt-

größen lagern sich um und eine weitere Laststeigerung bis zum Erreichen der Systemtragfähigkeit wird ermöglicht. Eine plastische Schnittgrößenermittlung bildet das Tragvermögen des Stahlfaserbetons am sinnvollsten ab. Die hiernach ermittelten Schnittgrößen fallen geringer aus als bei einer rein elastischen Betrachtung. Zudem erhöht sich bei weicheren Systemen der Lastanteil, der direkt vom Gebirge selbst abgetragen wird.

5 Kriterien für die Leistungsfähigkeit eines Stahlfaserbetons

Beton wird anhand seiner Druckfestigkeit in Klassen eingeteilt. Dabei ist es (fast) unerheblich, wie viel Zement oder welcher Zuschlag verwendet wird, um eine bestimmte Druckfestigkeit zu erreichen. Denn Zement ist nicht gleich Zement und Zuschlag nicht gleich Zuschlag! Dies ist bei Faserbeton nicht anders, denn auch hier gilt: Faser ist nicht gleich Faser! Stahldrahtfasern werden aus kaltgezogenen Drähten verschiedener Werkstoffgüten hergestellt. Die Zugfestigkeit liegt in der Regel zwischen 1.000 N/mm² und 2.500 N/mm². Die Faserlängen variieren zwischen 30 mm und 60 mm und deren Durchmesser zwischen 0,40 und 1,10 mm. Die Leistungsfähigkeit von Stahldrahtfasern und somit die des Stahlfaserbetons, ist im Wesentlichen abhängig von Faserdurchmesser, -länge, -verankerungsart, der Drahtzugfestigkeit und der Lieferform. Nachfolgend aufgeführte Kriterien sichern einen leistungsstarken Stahlfaserbeton zu:

- Endhaken
- möglichst dünn

contents is equivalent to a subcritical reinforcement. It is therefore primarily used in elements which permit redistribution of internal forces, and therefore multiple crack-formation (i.e., statically indeterminate structures).

Tunnels are highly statically indeterminate systems. The load combination of bending moment and compressive normal force is governing for the design in the ultimate Limit state. The stiffer the systems, the more greatly they attract bending moments. The higher the moments occurring, the greater the necessary degree of reinforcement. Flexible systems, on the other hand, bear the loading by means, primarily, of normal forces. This is, therefore, the rationale for the demand for flexible systems in modern tunnel construction. Unlike the situation with stiff systems, the deformation of the shell causes intensified activation of the ground's own load-bearing function. The forces to be absorbed by the support (segmental lining rings) are therefore lower in the case of ductile systems. The materials properties of steel-fibre-reinforced concrete are suitable in two ways for meeting the required load-bearing capacity:

1. Enhancement of cross-sectional load-bearing capacity

Steel-fibre-reinforced concrete in cracked condition remains capable of transferring loadings and taking up forces. Unlike the situation with non-reinforced concrete (mathematical assumption of tensile forces not allowable), this results in a significant increase in load-bearing capacity in structures exposed to bending requirements with normal forces. In many cases, the load-bearing capacity is sufficient to eliminate

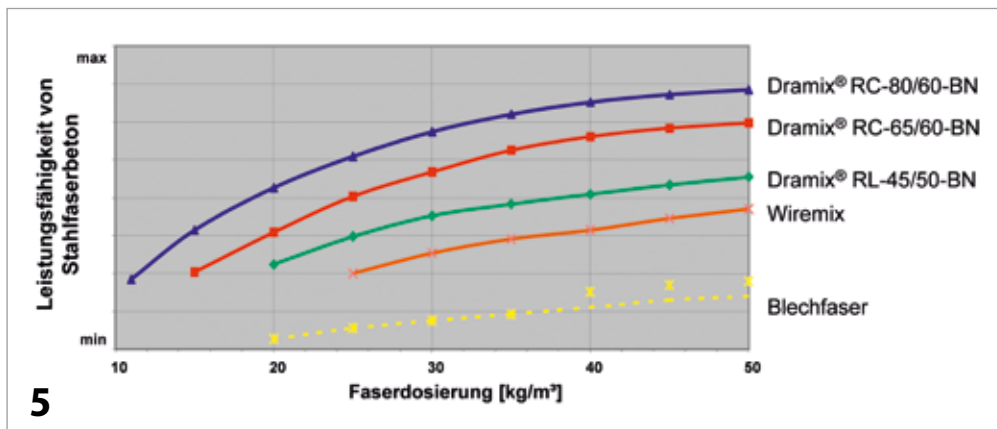
entirely the need for the traditional reinforcement which otherwise would be necessary.

2. Enhancement of system load-bearing capacity

Once the initial cracking load has been exceeded, steel-fibre-reinforced concrete's ductile material behaviour permits transfer of forces to other cross-sectional elements; stresses are redistributed till the final load-bearing capacity of the system is obtained. Plastic analysis comprises the load-bearing capability of steel-fibre-reinforced concrete most rationally. The resulting stresses determined on this way are lower than in the case of a purely elastic analysis. In addition, the load taken up borne directly by the rock itself is also increased in the case of more flexible systems.

5 Criteria defining the performance of a steel-fibre-reinforced concrete

Concrete is classified by its strength in compression. It is of (almost) no significance how much cement and which aggregate and additives are used to achieve a particular compressive strength - cement is not just cement, and aggregate is not just aggregate! This adage is also true of fibre-reinforced concrete since, here too: fibres are not just fibres! Steel wire fibres are produced from cold-drawn wire of various steel grades. Their tensile strength is generally between 1,000 N/mm² and 2,500 N/mm²; fibre lengths vary between 30 mm and 60 mm, their diameters between 0.40 and 1.10 mm. The performance of steel wire fibres and, therefore, of the resultant steel-fibre-reinforced concrete, depends es-



5 Unterschiedliche Stahlfasertypen und Ihre Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit
Various steel-fibre types and their effects on performance

- möglichst lang
- hohe Schlankheit
- an die Betongüte angepasste Zugfestigkeit
- optimierte Betonrezeptur.

Drei unterschiedliche Stahlfasertypen veranschaulichen beispielhaft die laufende Meterlänge und Stückzahl Fasern für 1 kg. Der Quotient l/d stellt das Längen/Durchmesser-Verhältnis und somit eine Art Leistungsklasse dar (Bild 5).

RL-45/50-BN	$l/d = 45$
L = 147 m/kg	
2.950 Fasern/kg	

RC-65/60-BN	$l/d = 65$
L = 200 m/kg	
3.330 Fasern/kg	

RC-80/60-BN	$l/d = 80$
L = 288 m/kg	
4.800 Fasern/kg	

Je höher die Stückzahl und je länger die Fasern, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass ein Riss auf eine Faser trifft! Das Verkleben zu Bündeln ermöglicht auch sehr leistungsfähige Fasern mit großen Schlankheiten ($l/d > 50$) gleichmäßig im Beton zu verteilen. Entscheidend ist zudem, eine an die Betongüte

angepasste Zugfestigkeit zu wählen, um die Duktilität des Stahlfaserbetons aufrecht zu erhalten. Normalfeste Stahldrahtfasern (1.000 bis 1.300 N/mm²) werden im Allgemeinen für Betone der Festigkeitsklasse bis C 50/60 verwendet. Für Festigkeiten darüber hinaus empfehlen sich mittel- bzw. hochfeste Stahldrahtfasern (1.500 bis 2.500 N/mm²).

6 Testverfahren zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit

6.1 Vorbemerkung

Probekörper werden generell mittels verformungsgesteuerten Verfahren unter Biegung getestet. Grundsätzlich lässt sich zwischen statisch bestimmten Balkentests und statisch unbestimmten Plattentests unterscheiden. Statisch bestimmte Balkentests dienen der Ermittlung von Materialeigenschaften. Die ermittelte Nachrissbiegezugfestigkeit wird für eine Bemessung von Tübbingelementen als Kennwert auf der Materialwiderstandsseite genutzt. Die Grundlagen von Balkentests werden im nächsten Unterpunkt erörtert. Der wohl geläufigste Plattentest, der

essentially on fibre diameter, fibre length, fibre anchorage, wire tensile strength and delivery form. The criteria listed below assure a high-performance steel-fibre-reinforced concrete:

- Hooked ends
- As thin as possible
- As long as possible
- High slenderness
- Tensile strength appropriate to the strength of concrete
- Optimised concrete recipe.

Three different types of steel fibre illustrate, by way of example, the running-meter length and number of fibres for 1 kg. The l/d quotient states the length:diameter ratio and thus a form of performance classification (Figure 5).

RL-45/50-BN	$l/d = 45$
L = 147 m/kg	
2,950 fibres/kg	

RC-65/60-BN	$l/d = 65$
L = 200 m/kg	
3,330 fibres/kg	

RC-80/60-BN	$l/d = 80$
L = 288 m/kg	
4,800 fibres/kg	

The longer the fibres and the higher their number, the greater the probability that a crack will cross a

fibre! Glued bundles of fibres also permits extremely high-performance fibres of great slenderness ($l/d > 50$) distributed uniformly in the concrete. Also decisive is the selection of a tensile strength appropriate to the strength of concrete, in order to maintain the ductility of the steel-fibre-reinforced concrete. Steel wire fibres of standard tensile strength (1,000 to 1,300 N/mm²) are generally used for concretes of the strength classes up to C 50/60. Medium- or high-strength steel wire fibres (1,500 to 2,500 N/mm²) are recommended for higher strength classes.

6 Test procedures for determination of performance

6.1 Preliminary note

Test specimen are generally tested by means of deflection-controlled test setups. It is possible to differentiate in principle between statically determinate beam tests and statically indeterminate panel tests. Statically determinate beam tests are used for the determination of materials properties. The flexural tensile strength determined after cracking is used as a characteristic value on the material-resistance side for dimensioning of segmental-lining elements. The fundamental principles of beam tests are examined in the following sub-section. The probably most widely used panel test, the „EFNARC panel“, is subject to a verification procedure for determination of system load-bearing capacity. The square panel positioned on all sides is statically indeterminate and simulates the load-bearing behaviour of a shotcrete shell. System load-bearing capacity is evaluated as energy-absorption capacity, and set against the re-

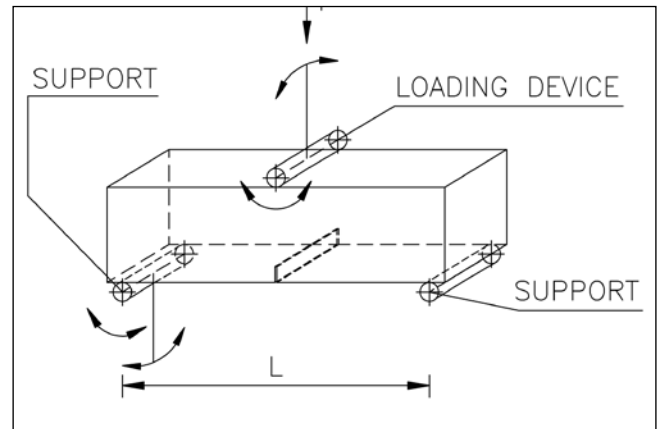
„EFNARC Panel“, unterliegt einem Prüfverfahren zur Ermittlung der Systemtragfähigkeit. Die ringsum gelagerte Quadratplatte ist statisch unbestimmt und simuliert das Tragverhalten einer Spritzbetonschale. Die Systemtragfähigkeit wird als Energieabsorptionsvermögen ausgewertet und der Anforderung an die Spritzbetonschicht entgegengestellt. Da dieser Plattentest eine Systemtragfähigkeit ermittelt, kann das Ergebnis nicht für die Bemessung einzelner Elemente (z.B. Tübbinge) herangezogen werden. Der Plattentest wird im Rahmen dieses Beitrags nicht weiter vertieft.

6.2 Statisch bestimmte Biegebalkenprüfungen

Die Ermittlung der Materialeigenschaften zur Abbildung der Momenten Tragfähigkeit erfolgt über verformungsgesteuerte Biegebalkenprüfungen. Mit dem Testverfahren statisch bestimmter Prüfbalken liegt ein geeignetes Verfahren vor, die Ergebnisse in eine Bemessung zu überführen (z.B. für die Querschnittstragfähigkeit in den Bauzuständen oder für das M-N-Interaktionsdiagramm). Die Testmethode nach EN 14651 [4] sieht einen Drei-Punkt-Biegeversuch vor (Bild 6, rechts).



Balkenprüfung: 4-Punkt-Biege-Versuch (links) und Prinzipdarstellung des 3-Punkt-Biege-Versuchs (rechts)
Beam test: four-point bending test (left) and view in principle of the three-point bending test (right)



Die Auswertung der Lastverformungskurve erfolgt über residuelle Werte an definierten Durchbiegungspunkten. Das Testverfahren nach JSCE SF-4 [6] sieht einen Vier-Punkt-Biegeversuch vor (Bild 6, links). Die Auswertung der Lastverformungskurve erfolgt über äquivalente Werte (Auswertung der Fläche unterhalb der Kurve). Das DBV-Merkblatt [3] sowie die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [2] regeln ebenso einen Vier-Punkt-Biegeversuch. Unterschiede gibt es in der Auswertungsmethode. Im Allgemeinen werden zwei Verformungsbereiche ausgewertet. Die Leistungsfähigkeit unter geringer Balkendurchbiegung wird für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit herangezogen.

quirements made on the shotcrete layer. Since this panel test determines a system load-bearing capacity, the result cannot be used for the dimensioning of individual elements (e.g. segmental support rings). The panel test is not examined in any more detail in this article.

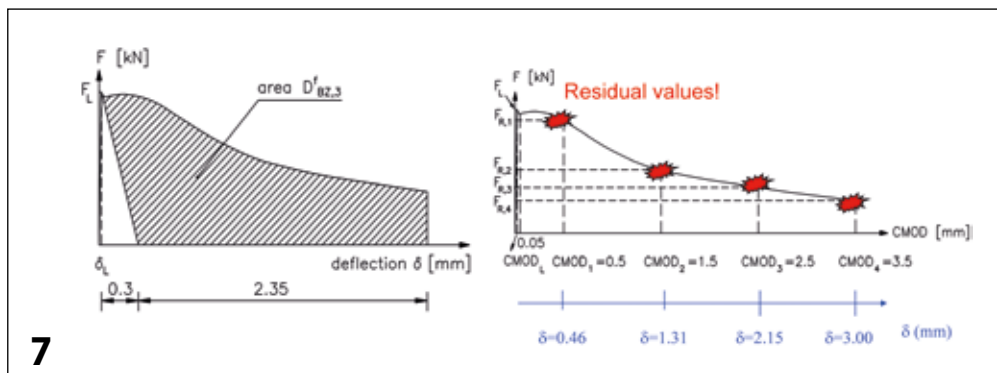
6.2 Statically determined beam tests

Determination of materials properties to reveal the bending moment capacity is performed by means of deflection-controlled beam tests. The test procedure utilising statically determinate test beams provides a method suitable for conversion of the results to a design (for cross-sectional capacity in the various states of construction, or for the

M-N interaction diagram, for instance). The EN 14651 test method [4] issues a three-point bending test (Figure 6, right). The load/deflection curve is evaluated by means of residual values at defined deflection points. The JSCE SF-4 test procedure [6] issues a four-point bending test (Figure 6, left). The load/deflection curve is evaluated on the basis of equivalent values (evaluation of the area below the curve). The German society of concrete (DBV) recommendation [3] and the DAfStb guideline for steel-fibre-reinforced concrete [2] also foresee a four-point bending test. The evaluation methods differ, however. Two deformation zones are generally evaluated. Performance at low beam deflection is used for analyses in serviceability limit state. Performance at greater beam deflection is utilised for analyses in the ultimate limit state (Figure 7).

6.3 Full scale tests

By means of the available calculation methods it is sometimes hardly possible to figure out the ultimate material resistance, particularly if such elements are exposed to bursting and spalling forces. The ultimate load-bearing



Lastverformungskurven: Auswertung anhand äquivalenter Werte (links) und anhand residueller Werte (rechts)
Load/deflection curves: Evaluation on the basis of equivalent values (left) and on the basis of residual values (right)

Die Leistungsfähigkeit unter größerer Balkendurchbiegung wird für Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit genutzt (Bild 7).

6.3 Belastungstest an Großelementen

Mit den zur Verfügung stehenden Berechnungsmodellen lassen sich insbesondere auf der Materialseite nicht immer die Widerstandsgrößen hinreichend ermitteln, speziell wenn es um Nachweise der aufnehmbaren Spalt- und Randzugkräfte geht. Die Grenztragfähigkeit des verwendeten Materials lässt sich daher sehr gut an experimentellen Untersuchungen ermitteln (Bild 8).

7 Regelwerke und Normierung von Stahlfasern

7.1 Regelwerke

In Deutschland stand bisher mit dem DBV Merkblatt „Stahlfaserbeton“ [3] ein geschlossenes Regelwerk zur Bemessung von Stahlfaserbetonbauteilen zur Verfügung. Dieses Merkblatt basiert auf dem DBV Merkblatt „Tunnelbau“, beinhaltet jedoch auch europäische Entwicklungen auf dem Normengebiet. Mit dem DBV Merkblatt „Stahlfaserbeton“ [3] wurde ein fundiertes Hilfsmittel zur Bemessung von Stahlfaserbeton bereitgestellt. Allerdings weist das Merkblatt keinen Normencharakter auf. Bedingt durch diese Tatsache, hat sich der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) entschlossen eine Richtlinie zu erarbeiten, die sich an die DIN 1045-1 anlehnt. Die Schlussfassung der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [2] wurde im März 2010 veröffentlicht, ergänzt und ändert Abschnitte der DIN 1045-1, und weist nach



Belastungstest an einem Einzelsegment
Load test on an individual segment

Aufnahme in die Bauregelliste einen vollständigen Normencharakter auf. Auch in der europäischen Nachbarschaft sind Bemessungsregeln für den Stahlfaserbeton erarbeitet worden. Zu erwähnen ist die Schweiz mit Ihrer Empfehlung SIA 162/6 [10], Österreich mit Ihrer Richtlinie „Faserbeton“ [8], die Niederlande mit Ihrer CUR-Richtlinie aber auch RILEM, in der das Technische Komitee TC 162 unter dem Titel „Test and Design for Fibre Reinforced Concrete“ Empfehlungen für die Prüfung und Bemessung von Stahlfaserbeton erarbeitet hat. Im FIB Model Code 2010 [7] ist Stahlfaserbeton ebenfalls aufgenommen.

7.2 Normierung von Stahlfasern

In Europa müssen Stahlfasern zur Verwendung in Beton mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet werden. Die Mindestanforderungen an Stahlfasern werden in der harmonisierten Norm DIN EN 14889-1 [5] beschrieben. Die Norm DIN EN 14889-1 [5] legt Anforderungen für Stahlfasern für Beton, Mörtel und Einpressmörtel für tragende und andere Zwecke fest. Es gibt zwei unterschiedliche

capacity of the material used can therefore be determined extremely well by means of experimental tests (Figure 8).

7 Codes and standards for steel fibres

7.1 Codes

A code has been available in Germany for the dimensioning of steel-fibre-reinforced concrete elements up to now, in the form of the DBV „Steel-fibre-reinforced concrete“ recommendation [3]. This is based on the DBV „Tunnel Engineering“ recommendation but also includes European developments in the field of standardisation. The DBV „Steel-fibre-reinforced concrete“ recommendation [3] provides a well founded aid to the dimensioning of steel-fibre-reinforced concrete. This code does not have the character of a standard, however. In view of this fact, the DAfStb decided to draft a guideline orientated around DIN 1045-1. The final edition of the DAfStb „Steel-fibre-reinforced concrete“ guideline [2] was published in March, 2010. This guideline replaces and complements parts of DIN 1045-1 and after being taken up in the List of building materials it has a status of a code. Rules of dimensioning for steel-fibre-reinforced

concrete have also been drafted in neighbouring European countries; here, Switzerland may be mentioned, with its Recommendation SIA 162/6 [10], also Austria, with its „Fibre-reinforced concrete“ guideline [8], and the Netherlands, with the CUR rules and RILEM, in which Technical Committee TC 162 has set out recommendations for the testing and dimensioning of steel-fibre-reinforced concrete under the title „Test and Design for Fibre Reinforced Concrete“. Steel-fibre-reinforced concrete has also been included in the FIB Model Code 2010 [7].

7.2 Standardisation of steel fibres

In Europe, steel fibres for use in concrete must be marked with the CE symbol. The minimum requirements for steel fibres are defined in the harmonised DIN EN 14889, Part 1 [5] standard. DIN EN 14889, Part 1 [5] defines requirements for steel fibres for concrete, mortar and grouting mortar for load-bearing and other purposes. There are two different systems for certification of conformity: „System 1: Steel fibres for load-bearing purposes“ and „System 3: Steel fibres for other purposes“. DIN EN 14889, Part 1 [5] defines „load-bearing purposes“ as follows: „When fibres are used for load-bearing purposes, the fibres added contribute to the load-bearing capacity of a concrete element“. Certification of conformity in accordance with „System 1“ is therefore required for virtually all cases of practical relevance. To eliminate the possibility of mistakes, only steel fibres controlled and certified in accordance with „System 1“ and bearing the corresponding EC certificate of conformity should

Systeme der Konformitätsbescheinigung: „System 1 - Stahlfasern für tragende Zwecke“ und „System 3 - Stahlfasern für andere Zwecke“. Die Norm DIN EN 14889-1 [5] definiert tragende Zwecke wie folgt: „Bei der Verwendung von Fasern für tragende Zwecke tragen die zugegebenen Fasern zur Tragfähigkeit 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 dem Nutzer eine Idee über die Leistungsfähigkeit einzelner Fasertypen zu vermitteln, 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 [4] 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. Die Angabe der erforderlichen Menge zum Erreichen dieser Leistungsfähigkeit vermittelt einen An-

be used. Permissible tolerances for the main properties of the fibres in each case are issued in the standard. The influence of the fibres on the strength of concrete is tested on a reference concrete, in order to provide the user with an idea of the performance of individual fibre types. The minimum steel fibre content necessary to achieve a residual flexural tensile strength of 1.5 N/mm² with a crack width of 0.5 mm, and of 1.0 N/mm² with a crack width of 3.5 mm, in a test procedure in accordance with DIN EN 14651 [4], is defined. The amount of fibres need to be declared to obtain these performances. That provides reference of the performance of individual fibre types (Figure 9).



CE Label der Stahldrahtfaser Dramix RC-80/60-BN

CE label for Dramix RC-80/60-BN steel fibres

8 Reference projects

Numerous tunnel projects around the world have been implemented using steel-fibre-

Stahldrahtfasern zur Bewehrung von Tübbingem im Tunnelbau

Dramix®

@ BEKAERT

better together

Technische Stärken:

- hohe Energieaufnahmefähigkeit
- duktiler Materialverhalten
- hohes Nachrisszugverhalten
- hoher Widerstand gegen Schlägeinwirkung, konzentrierte Lasten und Ermüdung
- reduzierte Riss- und Abplatzneigung
- Dauerhaftigkeit



Wirtschaftliche Vorteile:

- Verzicht auf Betonstahlbewehrung
- zeitoptimierter Fertigungsprozess
- weniger Tübbingausschuss
- geringere Sanierungskosten

Tübbingem:

- ausführbar in reinem Stahlfaserbeton
- auch als Kombibewehrung möglich
- feuerbeständig und dauerhaft



Bekaert GmbH

Otto-Hahn-Str. 20 - D-61381 Friedrichsdorf
T +49 6175 7970 137 - F +49 6175 7970 108
building.germany@bekaert.com

www.bekaert.com/building

Dramix®-Stahldrahtfasern bieten auch im Spritzbeton Vorteile!



Temporäres Fertigteilwerk, Project CTRL, London

Temporary prefabrication facility, CTRL project, London

haltswert bezüglich der Leistungsfähigkeit des jeweiligen Fasertyps (Bild 9).

8 Referenzprojekte

Zahlreiche Tunnelprojekte wurden weltweit in den letzten Jahren unter Verwendung von Stahlfaserbeton-Tübbingen realisiert. Ein paar wenige Referenzobjekte werden nachfolgend kurz erörtert.

Channel tunnel rail link

CTRL (Channel tunnel rail link) ist der Verbindungstunnel zwischen London und Frankreich. Das Bauvorhaben wurde in den Jahren 2003 bis 2004 fertig gestellt. Insgesamt 200.000 Einzelsegmente wurden in einem temporären Fertigteilwerk zur Realisierung des Projektes gefertigt (Bild 10). Bei einem Innendurchmesser von 7,15 m und einer Schalendicke von 350 mm wurde ein Ring aus 9 Segmenten + Schlussstein zusammengestellt. Sehr hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit wurden im Rahmen der Ausschreibung dieses Projektes definiert. Dabei galt es ein widerstandsfähiges Material gegen aggressive Umweltbedingungen einzusetzen und eine Lebensdauer der Tunnelringe von 120 Jahren zu projektieren. Der Gedanke einen

leistungsstarken Stahlfaserbeton zu verwenden war daher nicht fern. Der Stahlfaserbeton wurde mit Dramix Stahldrahtfasern RC-80/60-BN realisiert. Im Vergleich zu üblichen Erfahrungswerten herkömmlich bewehrter Tübbinge war die Anzahl einzelner Segmente, die infolge Beschädigungen ausgewechselt bzw. nachträglich saniert werden mussten äußerst gering.

Oenzbergtunnel

Der Oenzbergtunnel gilt als Schlüsselstelle der Neubau-strecke, der im Rahmen des Projekts „Bahn 2000“, Linie Bern-Zürich, gebaut wurde. Der doppelspurige, 3.160 m lange Oenzbergtunnel wurde mit einer Mix-Shield-Tunnelbohrmaschine aufgeföhren. Da die Aufnahme der Tübbingproduktion kurz bevorstand, stand mit dem Einsatz von Stahlfasern eine elegante und schnelle Lösung bereit. Im Rahmen dieses Bauvorhabens wurden Versuche mit Hilfe modernster Einrichtungen durchgeführt, um das Verhalten der Tübbinge, insbesondere der Tübbingfugen, unter vor Ort herrschenden Belastungszuständen zu untersuchen. Dabei wurden folgende Bewehrungsarten miteinander verglichen:

reinforced concrete segmental linings in recent years. A number of these projects are summarised as follows.

Channel Tunnel Rail Link

The CTRL (Channel Tunnel Rail Link) is the tunnel connecting Britain and France. This project was completed in the 2003 to 2004 period. A total of 200,000 individual segments were produced in a temporary prefabrication facility to supply the project (Figure 10). Each ring consisted of nine segments plus a keystone, for an inner diameter of 7.15 m and a lining thickness of 350 mm. Extremely demanding durability requirements were defined in the invitation to tender for this project. A material resistant to aggressive environment conditions was to be used, and a service-life of 120 years to be indicated for the segmental tunnel lining rings. The concept of using a high-performance steel-fibre-reinforced concrete was, therefore, a relatively obvious step. The steel-fibre-reinforced concrete used contains Dramix RC-80/60-BN steel wire fibres. The number of individual segments which required replacement or retrospective repair due to damage was exceptionally low, on the basis of empirical data for conventionally reinforced segmental lining systems.

Oenzberg Tunnel

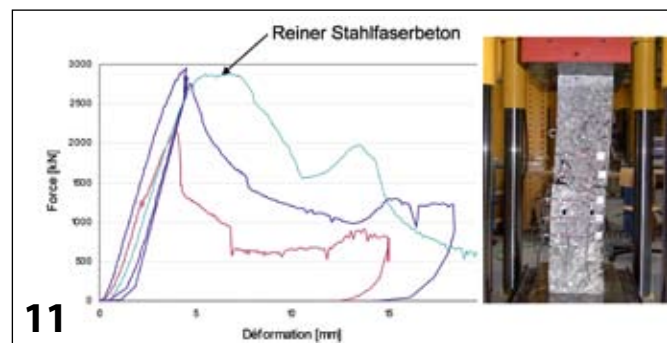
The Oenzberg Tunnel is the key engineering work on the new Bern-to-Zurich line, constructed as part of Switzerland's „Rail 2000“ project. This double-track, 3,160 m long tunnel was driven using a mix-shield tunnel-boring machine. The use of steel fibres provided an elegant and rapid solution, since production of segments was scheduled to start in a short time. Tests using ultra-modern equipment were performed in the context of this construction project, in order to investigate the performance of the segmental lining, and of the segment joints, in particular, under the load conditions prevailing in the tunnel. The following types of reinforcement were comparatively assessed:

- Purely steel-fibre reinforcement
- Combined reinforcement (steel fibres and reinforcement meshes)
- Conventional reinforcement (reinforcement meshes and rebars).

Figure 11 illustrates the ductile material behaviour of steel-fibre-reinforced concrete under compressive loading. In addition, the same load level as with the conventional reinforcement alternative was also achieved.

The Hofoldingen Stollen

In Germany, a 17.50 km long tunnel project using segmental lining consisting entirely of steel-fibre-reinforced concrete was implemented in the form of the construction of a drinking-water supply conduit from the Mangfalltal valley (Figure 12). The „Hofoldingen Stollen“ was constructed between 1999 and 2004. The segmental lining ring, consisting of six segments with



Druckversuche an Ringfugen von Tübbingen (Projekt Oenzbergtunnel)

Compression tests on annular lining segment joints (Oenzberg Tunnel project)

- reine Stahlfaserbewehrung
- kombinierte Bewehrung; Stahlfasern und Bewehrungsnetze
- konventionelle Bewehrung (Bewehrungsnetze, Stabbe-
wehrung).

Bild 11 verdeutlicht das duktile Materialverhalten von Stahlfaserbeton unter Druckbelastung. Zudem wurde das gleiche Lastniveau wie bei der Ausführungs-
alternative mit herkömmlicher Bewehrung erreicht.

Hofoldinginger Stollen

Mit dem Bau einer Trinkwasserzuleitung aus dem Mangfalltal wurde in Deutschland ein 17,50 km langes Tunnelprojekt mit Tübbingungen aus reinem Stahlfaserbeton realisiert (Bild 12). Der

Hofoldinginger Stollen wurde in der Bauzeit von 1999 bis 2004 ausgeführt. Der Tübbingring bestehend aus 6 Segmenten in einem Durchmesser von 3,30 m besitzt eine Schalendicke von 180 mm und wurde mit 40 kg/m³ Dramix RC-65/60-BN ausgeführt. Durch Einsatz von Stahlfaserbeton wurde der Bauprozess deutlich beschleunigt. Die ansonsten geläufigen Problematiken hinsichtlich Kanten- und Eckabplatzungen an einzelnen Segmenten konnten zufriedenstellend eingeschränkt werden.

Wehrhahnlinie Düsseldorf

Mit der Wehrhahnlinie Düsseldorf steht ein weiteres Referenzobjekt in Deutschland zur Verfügung. Die 3,4 km lange

a diameter of 3.30 m, has a lining thickness of 180 mm and was fabricated using 40 kg/m³ of Dramix RC-65/60-BN steel fibres. The use of steel-fibre-reinforced concrete significantly accelerated the construction process. The problems of spalling at edges and corners, otherwise frequently encountered on individual segments, were satisfactorily suppressed.

The Wehrhahn Line, Düsseldorf

The Wehrhahn Line, in Düsseldorf, provides a further reference project in Germany. The 3.4 km long Wehrhahn Line is to be completed by 2014, with no less than six new underground stations. The steel-fibre-reinforced concrete lining segments are



Hofoldinginger Stollen:
Verarbeitung des Stahlfaserbetons mit 40 kg/m³ Dramix RC-65/60-BN

The Hofoldinginger Stollen: Workability of steel-fibre-reinforced concrete containing 40 kg/m³ Dramix RC-65/60-BN

being used as temporary support for the station bores for a service period of three years. The tunnel bores have an outer diameter of 9.20 m. Each tunnel ring consists of 7+1 segmental ring lining elements. Element

> Deutschlands Nr. 1 bei Stahlfasern: www.krampeharex.com

krampeharex[®]



Österreichs Nummer eins im Tunnelbau.

Die Alpenrepublik setzt beim Tunnelbau auf **KrampeHarex**[®] – den Marktführer für sicheren, ökonomischen und fortschrittlichen Tunnelbau.

KrampeHarex[®]-Stahlfasern und KrampeFibrin[®]-Kunststofffasern
ersetzen konventionelle Bewehrungen und erhöhen den Brandschutz.

Schneller:

Der Bearbeitungsprozess ist ca. 2,5-mal schneller als bei konventioneller Mattenbewehrung.

Besser:

Faserbewehrungen halten dauerhaft und sicher – und verfügen mit Kunststofffasern über den heute bestmöglichen Brandschutz.


Günstiger:

Geringere Material- und Lohnkosten als bei herkömmlichen Bewehrungen sorgen für den Vorteil in Kalkulation und Angebot.

Wehrhahnlinie soll bereits im Jahr 2014 komplett mit sechs neuen unterirdischen Bahnhöfen fertig gestellt sein. Die Stahlfaserbetontübbinge werden als temporäre Sicherung der Bahnhöfen für eine Nutzungsdauer von drei Jahren eingesetzt. Die Tunnelröhren haben einen Außendurchmesser von 9,20 m. Jeder Tunnelring besteht aus 7+1 Tübbingen. Die Elementdicke beträgt 450 mm. Die statischen Nachweise wurden gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton geführt. Der Stahlfaserbeton wird unter Verwendung von Stahldrahtfasern Dramix RC-80/60-BN geliefert. Die laufende Qualitätskontrolle sieht Biegebalkenprüfungen zur Kontrolle der Leistungsfähigkeit und Auswaschversuche zur stetigen Kontrolle gleichmäßiger Faserverteilung in definierten Zeitabständen vor.

STEP Abu Dhabi

Eines der jüngsten Großprojekte mit Tübbingproduktion ist für das Tunnelprojekt STEP in Abu Dhabi 2010 angelaufen. Die Planung sieht einen insgesamt 42 km langen Abwassertunnel vor, der in drei „Lose“ unterteilt ist. Das Los T-02 befindet sich in der Ausführungsphase, ist ca. 15,6 km lang und soll bereits im Sommer 2012 fertig gestellt sein (Bild 13). Vorgesehen ist eine zweischalige Ausführungsvariante (unbewehrte Innenschale als „final lining“). Die Tunnelröhren haben einen Durchmesser von 6,30 m; die Elementdicke der einzelnen Tübbingelemente beträgt 280 mm. Aus betontechnologischer Sicht war die Zusammenstellung der Betonrezeptur eine wahre Herausforderung. Erhöhten Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sowie

erschweren geologischen Bedingungen hinsichtlich der Aggressivität des anstehenden Grundwassers galt es zu begegnen. Eine Ausführungsvariante in Stahlfaserbeton wurde festgelegt, um die Dauerhaftigkeit zu verbessern und Abplatzneigungen zu minimieren und so Wasserwegigkeiten von vorne herein zu verhindern. Aufgrund sehr hoher Spaltzugkräfte an den Verbindungsstellen der einzelnen Segmente wurde entlang der Querfugen eine lokale Zusatzbewehrung bemessen. Die Bemessung der Stahlfaserbetontübbinge erfolgte ansonsten in Anlehnung an das DBV-Merkblatt [3]. Der maßgebende Lastfall wurde im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt. Die erforderliche Nachrisszugfestigkeit gemäß Bestimmungen des DBV-Merkblatts von 1,6 N/mm² wurde mit einem Stahlfasertyp Dramix RC-65/60-BN mittels Biegebalkenprüfungen bestätigt. 




Tunnelbohrmaschine von Herrenknecht für das Projekt STEP in Abu Dhabi
Herrenknecht tunnel-boring machine for the STEP project in Abu Dhabi

thickness is 450 mm. The static analyses were performed in accordance with the DAfStb „Steel-fibre-reinforced concrete“ guideline. The steel-fibre-reinforced concrete was batched using Dramix RC-80/60-BN steel fibres. Continuous quality control is being done to check the performance at defined intervals. Beam tests for verification of performance, and wash-out tests for continuous monitoring of uniform fibre distribution is foreseen.

STEP, Abu Dhabi

One of the most recent major projects to include on-site segment production started in 2010 with the STEP tunnel project in Abu Dhabi. The planning here envisages a waste-water tunnel of a total of 42 km in length, with the work subdivided into three

lots. Lot T-02, with a length of approx. 15.6 km, is currently undergoing implementation and is to be completed by the summer of 2012 (Figure 13). A double-shell variant (non-reinforced inner shell as the „final lining“) is planned. The tunnel bores are of 6.30 m diameter, while the individual segmental lining elements have a thickness of 280 mm. The drafting of the concrete recipe was a real concrete technology challenge, since it was necessary to meet both elevated durability requirements and to counteract the aggressiveness of the groundwater in the geology. A steel-fibre-reinforced concrete variant was selected, in order to improve durability and minimise proneness to spalling, and thus eliminate permeability from the inception. Local additional reinforcement was incorporated along the transverse joints, in view of the extremely high tensile splitting forces occurring at the connecting points of the individual segments. Design of the steel-fibre-reinforced concrete lining segments was otherwise in accordance with the DBV code [3]. The critical load case in serviceability limit state was determined. The necessary tensile strength after cracking required according the rules of the DBV code, of 1.6 N/mm², was achieved using a Dramix RC-65/60-BN steel fibre type, and confirmed by means of beam tests. 

Literatur/References

- [1] Bemessung von Stahlfaserbeton im Tunnelbau, B.Maidl, A.Nitschke, M.Ortu, Bochum, June 1999
- [2] DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton, March 2010 edition
- [3] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, October 2001 edition
- [4] EN 14651, Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern – Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit)
- [5] EN 14889-1, Fasern für den Beton – Teil 1, Stahlfasern – Begriffe, Festlegungen und Konformität
- [6] JCI, Test for flexural strength and toughness for fibre reinforced concrete, JSCE SF-4 Japan Concrete Institute, 1984
- [7] Model Code 2010, First complete draft, Volume 1, bulletin 55
- [8] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik „Richtlinie Faserbeton“, July 2008 edition
- [9] R. Suter, P. Buchs, Precast fibre reinforced tunnel lining segments, Experimental Study, Final Report, University of Applied Sciences, Fribourg, 2008.
- [10] SIA 162/: 1999 Empfehlung Stahlfaserbeton