
Stahlfaserspritzbeton für den Tunnelbau - Verhalten bei Brand

STEEL FIBRE REINFORCED SHOTCRETE FOR TUNNELING - PERFORMANCE IN CASE OF FIRE ATTACK

GUNTHER BRUX

Brände in Verkehrstunnels wie 1996 im Eurotunnel und 1999 im Mont Blanc-Tunnel stellen ein großes Sicherheitsrisiko dar. Bei der Beurteilung des Brandverhaltens der Auskleidung steht daher der Personenschutz und die Wiederinstandsetzungsmöglichkeit im Vordergrund. Anhand von Forschungsergebnissen und den Reparaturarbeiten im Eurotunnel werden die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Stahlfaserspritzbeton zur Minimierung von Abplatzungen infolge Brandeinwirkung aufgezeigt.

Fire disasters in traffic-tunnels as 1996 in the Eurotunnel and 1999 in the Mont Blanc-tunnel represent a serious safety risk. When assessing the fire resistance of tunnel linings protection of men and the repair possibilities should be of main importance. Referring to recent research results and experiences from repair work in the Eurotunnel possibilities and limits of the usage of steel fibre reinforced shotcrete as a measure to reduce delamination due to fire attack are discussed.

1. Einleitung

In unterirdischen Verkehrsanlagen ist vor allem die Sicherheit der Benutzer zu gewährleisten, wobei Brand mit hohen Temperaturen, Rauch, reizende oder toxische Gase und hohe Temperaturen eine besondere Gefahrenquelle darstellen. Das hat der Brand am 24. März 1999 im 11,6 km langen Mont Blanc-Tunnel deutlich gezeigt, wo das etwa in Tunnelmitte von einem Lastkraftwagen ausgehende Feuer zu zahlreichen Toten geführt hat.

Im Rahmen des Personenschutzes und im Hinblick auf die Wiederinstandsetzungsmaßnahmen interessiert das Brandverhalten der Auskleidungen von unterirdischen Verkehrsanlagen [1]. Deshalb soll auf das Verhalten von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton bei Brand im Tunnel näher eingegangen werden.

2. Stahlfaserbewehrter Spritzbeton

Die mechanischen Eigenschaften von Spritzbeton werden größtenteils vom Wasser-/Bindemittel-Wert, der Bindemittelart und -menge, dem Microsilica-

(SiO₂)-Gehalt, der Erstarrungsbeschleuniger-Zugabe und der Nachbehandlung bestimmt. Durch die Zugabe von Stahlfasern lässt sich vor allem das Arbeitsvermögen (Duktilität) des Spritzbetons erhöhen und Schwindrisse verringern. Ihre Wirkung hängt ab von Form und Menge der wirksamen Stahlfasern [2], denn ein Teil der Stahlfasern aus dem Bereitstellungsgemisch geht durch Rückprall beim Spritzauftrag verloren.

Die Felssicherung und der Tunnelausbau mit stahlfaser- statt stahlmattenbewehrtem Spritzbeton kommt mit einer geringeren Auftragsdicke aus, weshalb ein kleinerer Ausbruchquerschnitt erforderlich ist [3]. Dadurch können sich die Kosten um etwa 25 % (Crapeig Tunnel/CH: 10 statt 13 cm) verringern.

Weitere Vorteile bei der Verwendung von Stahlfasern im Spritzbeton sind:

- höhere Schlag- und Stoßfestigkeit,
- größere Beständigkeit gegen Abrasion und Erosion,
- verbesserte Wasserdichtheit und Frostbeständigkeit dank Umwandlung von Schwindrissen in Haarrisse und
- besseres Haftvermögen gegenüber unbewehrtem oder mit Stahlmatten bewehrtem Spritzbeton.

2.1 Stahlfasern

Nicht alle auf dem Markt erhältlichen Stahlfasern genügen den Anforderungen für faserbewehrten Spritzbeton. Wesentliche Merkmale der Stahlfasern sind: Geometrie, Länge, Länge/Durchmesser-Verhältnis (L/D) und Stahlqualität. In der Praxis bewährt haben sich dünne, lange Fasern von hoher Stahlgüte, wie z.B. Stahldrahtfasern (Bild 1) Dramix ZL 30/0.50 (30 mm lang und 0,5 mm Ø) mit Haken an beiden Enden und Zugfestigkeit von 1000 bis 1300 N/mm², angeliefert als lose Einzelfasern oder in geklebten Streifen: Dramix ZC 30/0.50 und neu RC 65/35 BN (35 mm lang und mit 0,55 mm Ø) [2-4].

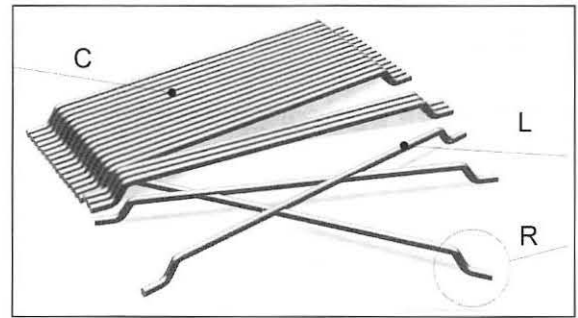


Bild 1: Dramix Stahldrahtfasern zum Streifen verklebt (C), als lose Einzelfaser (L) mit beidseitig Endhaken (R)

Bei der neuen Bezeichnung Dramix RC 80/60 BN statt ZC 60/0.80, die für die Tunnelinnenschalen in Stahlfaserpumpbeton verwendet werden, bedeutet die erste Zahl die Schlankheit (Faserlänge/Faserdurchmesser; L/D) und die zweite Zahl die absolute Faserlänge (L) in mm, d.h. 60 mm lange Stahldrahtfasern mit 0,75 mm Ø (D), Endhaken (R) und blanker Oberfläche (B) in normaler Zugfestigkeit (>1000 N/mm²) (N). Die Stahldrahtfasern mit großer Schlankheit (80 und 65) sind miteinander zu Streifen verklebt (C), während die Stahldrahtfasern mit Schlankheit 45 in loser Form (L) als Einzelfasern geliefert werden.

2.2 Leistungsklassen

Stahlfaserbeton deckt den Bereich zwischen unbewehrtem und bewehrtem Beton ab. Werden die Stahlfasern zur Aufnahme von Beanspruchungen in Rechnung gestellt, benötigt der Anwender Angaben über die Leistungsfähigkeit des Stahlfaserbetons. Im Gegensatz zu der dafür heute oftmals angewandten Größe der Stahlfasermenge in Gewicht (kg/m³ Beton) sollte die Leistung in Form der äquivalenten Biegezugfestigkeit angegeben werden [5]. Für die Bemessung von Stahlfaserbeton gibt es jetzt Leistungsfähigkeitsklassen (Tab. 1), bei denen außer dem Fasergehalt auch andere Merkmale der Stahlfasern berücksichtigt werden [6], wie z.B. die Art

Leistungsklasse N/mm ²	Fasergehalte in kg/m ³				
	Drahtfaser			Blechstreifen	Späne
	λ = 45	λ = 65	λ = 80		
1,0	30	20	15	60	80
1,5	40	30	25	≥ 100	≥ 100
2,0	50	40	30	≥ 100	≥ 100
2,5	≥ 70	50	40	≥ 100	≥ 100
3,0	≥ 85	60	50	≥ 100	≥ 100

Tab. 1: Leistungsfähigkeitsklassen (äquivalente Biegezugfestigkeit) eines Stahlfaserbetons der Betongüte B25 in Abhängigkeit vom Stahlfasergehalt, der Faserart und Faserschlankheit = L/D [6]

der Faserherstellung (Ziehvorgang, spanabhebend, stanzend und schälend) und die Faserschlankheit (Faserlänge/Faserdurchmesser, L/D). Es ist beabsichtigt, die bestehenden Richtlinien daraufhin zu überarbeiten.

Je größer die Faserschlankheit (L/D-Wert) ist, um so höher sind die mechanischen Eigenschaften des Betons durch die größere Überlappungslänge der in der Matrix verteilten Fasern; andererseits vergrößern sich die Schwierigkeiten beim gleichmäßigen Verteilen der Stahldrahtfasern in der Betonmischung. Um Igelbildung im Bereitstellungsgemisch und Verstopfer in der Förderleitung zur Spritzdüse zu vermeiden, werden die einzelnen Stahldrahtfasern zu Streifen aus 20 bis 30 Fasern mit einem wasserlöslichen Kleber aneinandergeliebt geliefert. Die Stahldrahtfasern vereinzeln sich teilweise beim Herstellen des Bereitstellungsgemischs, bei der Vorbenetzung und letztlich bei Wasserzutritt an der Spritzdüse.

2.3 Feuerfestbeton

Für temperaturbeanspruchte Bauteile im Feuerbetonbau in der Petrochemie, in Zement- und Stahlwerken (Hochöfen, Converter) und Verbrennungsanlagen werden hauptsächlich rostfreie Stahldrahtfasern wegen ihres Oxydationswiderstandes bei hohen Temperaturen eingesetzt, und zwar aus Werkstoffen (Cr, Ni, Mn, Si und C) für Temperaturen bis 1150 °C, wie z.B. Stahldrahtfasern Dramix RC 80/30 SN 1.4310 oder 1.4401 (statt früher ZL 30/0.40 und ZP 30/0.40) und RC 80/60 SN 1.4310 oder 1.4401 (statt ZP 50/0.50) mit abgewinkelten Faserenden (R), in geklebten Streifen (C) mit 30 und 60 mm Einzellängen (L) und je nach Schlankheit der Stahldrahtfasern mit 0,35 und 0,75 mm Ø (D) in Edelstahl (S) mit normaler Zugfestigkeit (N) (>1000 N/mm²).

Die Stahldrahtfaser-Zugabemenge ist wegen der Verarbeitbarkeit mit Zunahme des Zuschlaggrößtkorns (4 ... 16 mm) zu verringern [7]. Beim Spritzen von stahldrahtfaserbewehrtem Beton darf die Faserlänge höchstens 60 % des Förderschlauchinnendurchmessers betragen.

Nach durchgeführten Untersuchungen an Feuerbeton mit Edelstahldrahtfasern vergrößerte sich die Biegezugfestigkeit bei thermischer Schockbehandlung bei 800 °C gegenüber dem normalen Feuerbeton um mehr als das Doppelte; außerdem tritt eine wesentliche Verbesserung der mechanischen Stoßbelastbarkeit (400 %) und der aufnehmbaren Energie (10fach) ein. Da normaler Stahlfaserbeton eine höhere Biegezugfestigkeit als unbewehrter Feuerbeton besitzt, ist auf eine rissehemmende Wirkung der Stahldrahtfasern bei thermischer

Schockbehandlung zu schließen. Für den Brandfall im Tunnel kann man deshalb annehmen, daß Spritzbeton mit entsprechenden Stahlfasern in genügender Menge weniger Risse und Abplatzungen aufweist.

3. Forschungsergebnisse

3.1 Tunnelauskleidungen

Das Brandverhalten der Auskleidungen von unterirdischen Verkehrsanlagen interessiert hinsichtlich des Personenschutzes und der Wiederinstandsetzungsmöglichkeit. Je nach anstehendem Gebirge und gewählter Vortriebsart wird heute für die Tunnelauskleidung unbewehrter Beton oder Stahlbeton verwendet und der Frischbeton mit Pumpen oder als Spritzbeton - auch mit Zugabe von Stahlfasern - eingebaut. Bei maschinellem Vortrieb werden auch Stahlbetontübbinge - auch mit Zugabe von Stahlfasern [8] - als Auskleidung gewählt.

3.2 Brandfall und Abplatzungen

Die verschiedenen Brandlasten führen beim Brand im Tunnel zu unterschiedlichen Temperaturen (Bild 2). So wurden beim Brand im Mont Blanc-Tunnel, wo u.a. zahlreiche Lastkraftwagen verbrannten, über 1000 °C erreicht. Bei Brandversuchen in Materialprüfanstalten wurde meist die Einheitstemperaturkurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2 zugrundegelegt [1].

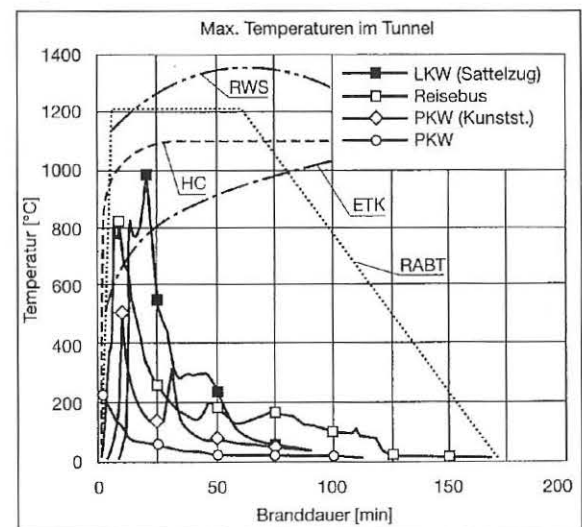


Bild 2: Maximale Temperaturen in Tunneln [1]
 ETK - Einheitstemperaturkurve DIN 4102 = ISO-834-Kurve
 HC - Hydrocarbon-Kurve (DIN EN 1363 Teil 2)
 RABT - Richtlinie für Ausstattung und Betrieb von Tunneln [25]
 RWS - Rijks Waterstraat/NL

Im Brandfall will die Auskleidung sich ausdehnen. Sie wird daran aber durch anstehenden Fels und den Verbund der nicht über den Tunnelring gleichmäßig erwärmten Tunnelauskleidung behindert. Dadurch treten zusätzliche Zwängungen bei gleichzeitig verringerter Baustofffestigkeit auf, was bei der Bewertung der Standsicherheit und Dichtheit des Tunnels gegenüber Grund- und Oberflächenwasser nach Bränden zu berücksichtigen ist.

Nach den bisherigen Erfahrungen mit Tunnelbränden größeren Ausmaßes [1] treten Schäden an der Tunnelauskleidung aus Beton überwiegend durch Abplatzungen unter unmittelbarem Brandangriff auf, die die Auskleidung meist nur wenig und begrenzt beeinträchtigen. Die im Beton der Tunnelauskleidung gespeicherte Feuchtigkeit kann aber durch den meist raschen Temperaturanstieg beim Brand im Tunnel zu tiefen, explosionsartig ablaufenden Abplatzungen führen. Abhilfe dagegen können sein

- Schutzbekleidungen (Brandschutzplatten) [9, 10],
- ein nachträglich aufgebrachtter Brandschutz-Spritzputz auf Putzträgern oder ohne Putzträger (z.B. zweilagige Vermiculite- oder Perlite-Zement- oder Gipsputze) [11] oder
- die Beimischung von Kunststofffasern (z.B. Polypropylen (PP), 2 - 3 kg/m³ Beton) in den Beton/Spritzbeton oder Tübbing-Beton [1, 12], die unter Hitzeeinwirkung herausmelzen und Poren und Kapillaren zur Dampfdruckentlastung freimachen, eine vom Hochleistungsbeton her bekannte Maßnahme.

Im Rahmen eines EUREKA-Programmes der EU sind umfangreiche Brandversuche im Tunnel zum Bestimmen der Auswirkungen (Brandtemperaturen usw.) und einige Untersuchungen zum Verhalten von Tunnelauskleidungen im Brandfall [13] durchgeführt worden. Danach kann die Abplatzungstiefe bei feuchtem Beton durch Zusatz von Stahlfasern von 40 bis 60 kg/m³ Beton verringert werden. Von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton war entsprechende Wirkung zu erwarten. Deshalb soll auf das Verhalten von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton bei Brand im Tunnel näher eingegangen werden.

3.3 Stahlfaserspritzbeton

Im Nachgang zu den o.a. Untersuchungen [1, 13] wurden deshalb Brandversuche an vergleichbaren Gewölbeausschnitten (4,50 x 2,20 x 0,24 m; 0,80 m Bogenstich) durchgeführt [14], die einer Tunnelauskleidung aus Spritzbeton mit Faserzusatz [15] entsprechen sollten. Das Bereitstellungsgemisch enthielt 400 kg PKZ 375 F, 12 kg SiO₂, Zuschläge der Körnung 0/8 mm aus verschiedenen Gesteins-

arten und Stahldrahtfasern Dramix 35/0.55 (50 kg/m³ Beton). Die 24 cm dicken Gewölbeausschnitte hat man im Trockenspritzverfahren über Kopf gespritzt, und zwar in 5 cm dicken Schichten nacheinander in etwa einstündigem Abstand - die ersten drei Schichten mit Zusatz eines Erstarrungsbeschleunigers (BE). Im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper einer Temperaturbeanspruchung nach ETK (Bild 2) ausgesetzt. Da bei dem Gewölbeausschnitt aus Stahlfaserspritzbeton starke Abplatzungen zum Durchbrand führten, musste der Brandversuch vorzeitig beendet werden. Ein zum Vergleich geprüfter Gewölbeausschnitt aus Spritzbeton mit Zugabe von Kunststofffasern (3 kg/m³ Beton) zeigte nach Versuchsende dagegen nur bis zu 4 cm tiefe Abplatzungen.

Diese Ergebnisse sind für die Beurteilung des Verhaltens von Stahlfaserspritzbeton im Brandfall nicht maßgebend, denn der Gewölbeausschnitt aus Stahlfaserspritzbeton entsprach weder in herstellungstechnischer noch in betontechnologischer und baumaschinentechnischer Hinsicht den praxisüblichen Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit im Tunnelbau [16]. Dafür gibt es mehrere Gründe.

3.3.1 Herstellungstechnik und Spritzbetonzusammensetzung

Der Spritzbeton und Stahlfaserspritzbeton für eine Tunnelauskleidung von 24 cm Dicke wird heute nicht mehr in 5 cm dicken Schichten und mit zeitlichem Abstand aufgetragen, sondern in einem Arbeitsgang oder die einzelnen Lagen frisch auf frisch aufgespritzt.

Um das zu erreichen, verwendet man beim Trockenspritzverfahren

- alkalifreie/-armen Erstarrungsbeschleuniger (BE), die keine geringere Endfestigkeit ergeben, oder
- Spritzemente oder Spritzbindemittel [17, 18] für umweltfreundlichen Spritzbeton.

Aber auch im Naßspritzverfahren lassen sich heute fast beliebig dicke Schichten [17] auftragen. Diese Arbeitsweisen haben sich durch den immer rascheren Arbeitsfortschritt beim Tunnelvortrieb in Spritzbetonbauweise ergeben, der zunehmend im Wettbewerb mit maschinellen Vortrieben steht.

Durch das Aufbringen des Spritzbetons und Stahlfaserspritzbetons in größeren Schichtdicken wird vermieden, daß

- ein Gewölbeausschnitt aus mehreren dünnen Schichten ohne wesentlichen Verbund entsteht, die beim Brandversuch infolge rascher Erwärmung nacheinander abplatzen, und
- die Zusammensetzung des Stahlfaserspritzbetons

sich durch erhöhten Anfall von Rückprall nachteilig verändert [19,20];
 durch den erhöhten Anfall Rückprall wurde
 · der Stahlfasergehalt um 50 % auf rd 25 kg/m³ Spritzbeton,
 · der Anteil des Grobkorns 4/8 mm um mehr als die Hälfte und - die Anzahl an Poren und Kapillaren im Spritzbeton durch starke Anreicherung im Feinstkornbereich verringert, die im Brandfall zur Dampfdruckentlastung beitragen und beim Fehlen Abplatzungen begünstigen.

Man sollte auf die Zugabe von SiO₂-Stoffen zum Spritzbeton im Tunnelbau verzichten, weil sie seine Dichtigkeit, Festigkeit und Sprödheit (wie bei einem Hochleistungsbeton) vergrößern, was im Brandfall ein ungünstiges Verhalten des Spritzbetons bewirkt und sein Arbeitsvermögen (Duktilität) verringert. Für den Tunnelvortrieb benötigt man besonders im druckhaften Gebirge aber Spritzbeton eher mit rheologischem Verhalten.

3.3.2 Baumaschinentechnologie

Die im Tunnelbau in kurzer Zeit einzubauenden großen Mengen von Spritzbeton erfordern besonders für den einschaligen Tunnelausbau mit Spritzbeton und Stahlfaserspritzbeton [17] leistungsfähige Betonspritzmaschinen (bis zu 8 statt nur 1,4 bis rd 2 m³/h Förderleistung) und entsprechend große Förderschlauch- und Spritzdüsendurchmesser (57 bis 114 statt 38 mm Ø bei 35 mm Stahlfaserlänge!) sowie zur Verbesserung der Betonqualität Spritzbetonroboter. Deshalb waren die zum Herstellen des Stahlfaserspritzbeton-Gewölbeausschnitts eingesetzten Maschinen und Geräte (Betonspritzmaschine, Förderschlauch und Spritzdüse) nicht geeignet.

4. Folgerungen

Dies zeigt, daß die in den Regelwerken für die Herstellung, Anwendung und Güteüberwachung von Spritzbeton [21,22] geforderte Eignungsprüfung unerlässlich und auch hinsichtlich der Prüfkörper (hier Tunnelgewölbeausschnitte) zu beachten ist. Sie darf sich nicht nur auf die Zusammensetzung (Zusammenwirken der verschiedenen Bestandteile) und Eigenschaften des Bereitstellungsgemischs und Spritzbetons beziehen, sondern hat auch die am Bauwerk vorgesehene Herstellung des Spritzbetons hinsichtlich

- der später eingesetzten Maschinen und Geräte sowie
- die Auftragsart (Überkopfspritzten, Schichtdicke usw.) zu berücksichtigen. Das gilt auch für Stahlfaserspritzbeton [23,24].

Da die Prüfkörper für Brandversuche zum Bestimmen des Verhaltens von Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau von ausschlaggebender Bedeutung sind, sollten für diesen Fall die Eignungsprüfungen in Forschungsstellen mit einem Spritzbeton-Versuchsstand durchgeführt werden, wie z.B. an der Ruhr-Universität Bochum [28] und Universität Innsbruck.

5. Bauausführung: Instandsetzung des Eurotunnels nach einem Brand [29-32]

Wegen der Besonderheiten solcher Instandsetzungsarbeiten stößt das Entstehen von Brandschäden in Verkehrstunneln auf großes Interesse. Der 50 km lange Eurotunnel, der zu 38 km unter dem Ärmelkanal verläuft, wurde nach sieben Jahren Bauzeit am 6. Mai 1994 eröffnet. Er verbindet das französische Festland mit der britischen Insel. Mit zwei eingleisigen Fahrtunneln (Bild 3) und dazwi-



Bild 3: Eingleisige Tunnelröhre des Eurotunnels mit Brandsensoren, Feuerlöschwasserleitung und Verbindungsstollen zum Rettungstunnel

schen einem Wartungs- und Rettungstunnel, die einschalig mit Stahlbetontübbingen ausgebaut sind, hat er nach Meinung der Fachwelt ein hochmodernes Sicherheitssystem.

Am 18. November 1996 kam ein Pendelzug mit einem in Brand geratenen Lastkraftwagen etwa in der Mitte des Tunnels zum Halten. Während die Feuerwehren die Menschen (Lastkraftwagenfahrer, Zugbegleitpersonal und Triebfahrzeugführer) über den Rettungstunnel rechtzeitig in Sicherheit bringen konnten, brannte der Zug größtenteils aus (Bild 4) und beschädigte dabei den Tunnelausbau erheblich:

- Die Auskleidung des südlichen Fahrtunnels wurde auf 3 bis 5 km Länge unterschiedlich stark durch Rauch verschmutzt.



Bild 4: Tunnelabschnitt nach dem Löschen des in Brand geratenen Lkw-Pendelzuges



Bild 5: Entfernen des brandgeschädigten Betons der Stahlbetontübbinge während der Instandsetzungsarbeiten

Die natürliche Feuchtigkeit in den Stahlbetontübbingen des einschaligen Tunnelausbaus bewirkte infolge der großen Hitze des Feuers von 800 bis über 1000 °C, daß der Beton auf etwa 500 m Tunnellänge teilweise abplatzte (Tab.2); in dem am meisten geschädigten Tunnelabschnitt platzten zwei Drittel der 40 cm dicken und 1,60 m breiten Tübbinge ab (Bild 5).

Schädigungs-Grade	Tunnel-länge (m)	Schädigungsart
1	192	sichtbare, geringe Betonabplatzungen
2	143	Tübbingbewehrung freigelegt
3/4	93	Betonabplatzungen bis halbe Tübbingdicke
5	53	Betonabplatzungen bis 30 cm Tiefe

Tab. 2: Schädigungsgrade der Auskleidung des südlichen Fahrtunnels durch einen Brand (Bild 4) - Tunnel-km 41,721 bis km 42,202

- Die Fahrleitung und Kabel wurden unterbrochen.
- Das Gleis und die Feste Fahrbahn aus Beton wurden durch das Deck des Pendelzugwaggonen weitgehend vor der Brandeinwirkung geschützt und somit wenig beschädigt; einige Schienen waren verbogen.
- Die Betriebswasserleitungen seitlich im Fahrtunnel hielten zwar dem Feuer stand, mußten aber dennoch erneuert werden.

Da der Zugbetrieb wegen des gesperrten Mittelteils des südlichen Fahrtunnels nur eingeschränkt möglich

war, sollten die Schäden bald beseitigt werden. Deshalb beauftragte die Betreibergesellschaft Euro-tunnel sogleich nach dem Brand zwei der an der Konstruktion des Tunnels beteiligte Bauunternehmungen mit der Planung der notwendigen Instandsetzungsarbeiten.

5.1 Instandsetzungsarbeiten

Um das Tunnelprofil von 7,60 m Innendurchmesser oberhalb der Fahrbahn wieder herzustellen, war die durch den Brand geschädigte Tunnelauskleidung überwiegend mit Spritzbeton entsprechend zu ergänzen.

Dem Spritzbeton gab man Stahldrahtfasern zu, um im Brandfall Abplatzungen zu verringern. Es wurden gleichzeitig zwei 720 m lange Arbeitszüge mit je 36 Waggons mit Arbeitsbühnen (Bild 5) eingesetzt. Je nach Schädigungsgrad (Tab.3) ergaben sich folgende Arbeitsschritte:

- zuerst Abstützen der durch den Brand geschädigten Tunnelauskleidung mit Gitterbögen (Bild 6) und Sichern der durch Abplatzungen stark geschwächten Stahlbetontübbinge mit Felsankern in der umgebenden Kreide,
- danach Säubern der verrußten Tunnelauskleidung und Beseitigen von Brandrückständen.
- Aufräumen der Betonflächen vor dem Spritzbetonauftrag durch Sandstrahlen, um die Haftung zu verbessern.
- Die durch die Abplatzungen freigelegte Bewehrung der Betonübbinge je nach Erhaltung heraus-schneiden oder belassen und sandstrahlen.
- lagenweises Auftragen von Spritzbeton und Einbauen von Betonstahlmatten.

1	<u>Oberflächenschädigung</u> bis 1 cm Tiefe	Säubern des beschädigten Betons und Vorbereiten der Oberfläche mit Sandstrahlen; Auftrag von Sikafloor 94
2	<u>Oberflächenschädigung</u> zwischen 1 und 7,5 cm Tiefe.	Säubern und Sandstrahlen wie vor; Auftrag von Lanko 731 mit Einbau einer Bewehrung, Nacharbeit mit Spritzbeton und ggf. Einbau von Tunnelbögen
3	<u>Betonschädigung</u> zwischen 7,5 und 10 cm Tiefe	Mechanischer und manueller Betonabtrag und Vorbereiten der Oberfläche mit Sandstrahlen; Reprofilierung mit Spritzbeton (ohne Stahlfasern) mit Einlage von Betonstahlgewebematte
4	<u>Betonschädigung</u> unter 20 cm Tiefe	Betonabtrag und Sandstrahlen wie vor; Ergänzen der Tübbingbewehrung, Reprofilierung mit Stahlfaserspritzbeton bis in Höhe der Bewehrung und Abschlußschicht Spritzbeton ohne Stahlfasern
5	<u>Betonschädigung</u> über 20 cm Tiefe	Betonabtrag, Sandstrahlen, Reprofilierung und Schlußschicht wie vor, jedoch im First nachinjizieren

Tab. 3: Instandsetzungsmöglichkeiten der brandgeschädigten Tunnelauskleidung je nach Schädigungsgrad

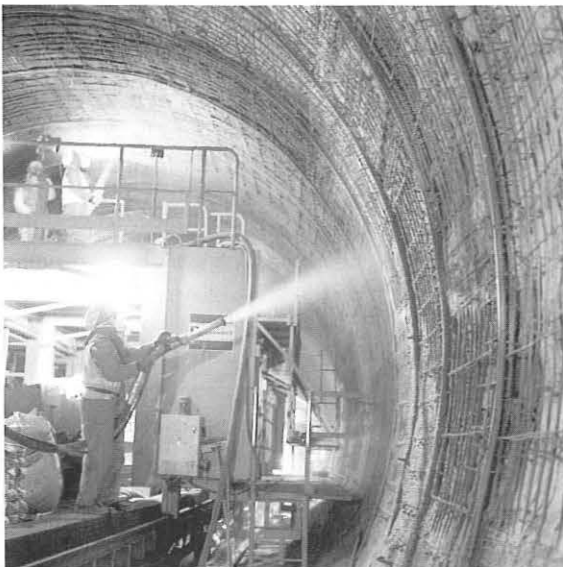


Bild 6: Spritzbetonarbeiten im Trockenspritzverfahren mit Vorbenetzungsdüse zur Verringerung der Staubentwicklung

5.2 Spritzbetontechnologie

Der Spritzbeton wurde im Trockenspritzverfahren aufgetragen. Man verwendete dazu ein werkmäßig vorbereitetes Bereitstellungsgemisch folgender Zusammensetzung je m³: 400 kg normalen Portlandzement, 1875 kg Zuschlagstoff mit 8 mm Größtkorn und 30 kg Stahldrahtfasern Dramix ZC 30/0.50. Die einzelnen Stahldrahtfasern waren 30 mm lang und hatten 0,5 mm Durchmesser und abgewinkelte Enden; sie wurden zu Streifen verleimt zugemischt und so Igelbildung im Bereitstellungsgemisch und Verstopfer in der Förderleitung zur Spritzdüse (50 mm Ø) vermieden.

Zum Nachweis der Druckfestigkeit des eingebauten Stahlfaserspritzbetons wurden der ertüchtigten Tunnelauskleidung laufend Bohrkerne entnommen; sie hatten im Alter von 28 Tagen Druckfestigkeiten von 35 bis 50 N/mm².

5.3 Baumaschinentechnologie

Für die Spritzbetonarbeiten waren vier Betonspritzmaschinen der Bauart ALIVA AL 242.2 mit je bis 4 m³/h Förderleistung eingesetzt (Bild 7), und zwar je zwei auf jedem der beiden Arbeitszüge. Mit Hilfe dieser Rotor-Maschinen gelangt das Bereitstellungsgemisch im Dünnstrom durch eine Schlauchleitung zur Spritzdüse, wo der Düsenführer das für den Spritzbeton notwendige Wasser zugibt.



Bild 7: Beschicken von zwei Betonspritzmaschinen mit werkgemischtem Bereitstellungsgemisch für Stahlfasertrockenspritzbeton durch Zuteilschnecke mit Vorbenetzung

Um die Staubentwicklung im Bereich der Spritzbetonmaschinen und des Düsenführers möglichst gering zu halten, wurde das im Silo angelieferte, offene trockene Bereitstellungsgemisch

- innerhalb der Zuteilschnecke für die Trockenspritzmaschinen (vgl. Bild 7) und
- mit Hilfe einer Vorbenetzungsdüse, die kurz vor der eigentlichen Spritzdüse im Förderschlauch angeordnet war (vgl. Bild 6) vorbenetzt.

Wegen des zusätzlichen Einbaus von Betonstahlmatten waren nur Spritzdicken bis zu 15 cm erforderlich; auf Erstarrungsbeschleuniger oder Spritzbindemittel konnte verzichtet werden.

Die Tunnelauskleidung wurde mit Stahlfaserspritzbeton bis auf 20 mm der ursprünglichen Dicke erneuert und danach als Abschluß eine feinere, nicht faserverstärkte Spritzbetonschicht von 20 mm Dicke aufgebracht, die im Profil genau der ursprünglichen Tunnelauskleidung (Bild 8) entsprach.



Bild 8: Mit stahldrahtfaserbewehrtem Spritzbeton instandgesetzter Tunnelabschnitt vor dem Wiedereinbau von Fahrleitung, Signalanlagen und weiteren Vorrichtungen

5.4 Bauzeit und Baukosten

Die geschilderten Instandsetzungsarbeiten wurden Anfang 1997 vergeben und innerhalb von acht Wochen fristgerecht ausgeführt. Dabei sind auf etwa 500 m Tunnellänge insgesamt rund 600 m³ Stahlfaserspritzbeton und Spritzbeton eingebaut worden. Wegen der vorgegebenen kurzen Bauzeiten wurde ohne Unterbrechungen gearbeitet, d.h. täglich 24 Stunden; 300 Mann waren dazu eingesetzt. Am 28. März 1997 übergab die bauausführende Firma den instandgesetzten Tunnelabschnitt (Bild 8) der Betreibergesellschaft. Nach Aus-

führung der übrigen Arbeiten (Oberbau, Fahrleitung, Signalanlagen usw.) wurde am 15. Mai 1997 der Betrieb in dem vom Brand betroffenen Tunnelabschnitt wiederaufgenommen. Heute verkehren außer den übrigen Zügen auch wieder die Lkw-Pendelzüge (3 Züge/Stunde/ Richtung) im Eurotunnel. Die Instandsetzungsarbeiten kosteten etwa 105 Millionen öS und die Beseitigung der Brandschäden insgesamt etwa 800 Millionen öS. Rechnet man dazu die Kosten für den Ersatz der durch den Brand geschädigten Eisenbahnfahrzeuge, die Einnahmeverluste durch die teilweise Schließung des Tunnels und die sechs Monate Aussetzung des Lkw-Pendelzugdienstes sowie die Schadensersatzansprüche aus den Lastkraftwagen und Frachten, die dem Brand zum Opfer gefallen sind, so betragen die durch den Brand entstandenen Kosten rund 4,2 Milliarden öS. Sie werden von einer für Katastrophen abgeschlossenen Versicherung übernommen.

5.5 Vergleich mit Forschungsergebnissen

Das Bereitstellungsgemisch für den Stahlfaserspritzbeton enthielt 400 kg Zement, Zuschlag der Körnung 0/8 mm und 30 kg Stahldrahtfasern Dramix ZC 30/0.50 (30 mm lang und 0,5 mm Ø).

Der Stahlfaserspritzbeton zur Instandsetzung der durch den Brand unterschiedlich stark beschädigten Tunnelauskleidung wurde mit leistungsfähigen Betonspritzmaschinen (bis 4 m³/h Förderleistung) in Schichten bis zu 15 cm Dicke (vgl. Tab. 3) eingebaut (Bohrkerne: 35 bis 50 N/mm²) und die durch den Brand geschädigte Tübbingbewehrung durch Einbau von Bewehrungsmatten (vgl. Bild 6) ergänzt, so daß im Brandfall weniger Abplatzungen entstehen werden.

6. Literatur

- [1] Kordina, K.: Brandschäden und Entrauchungsprobleme bei langen Tunnelanlagen. Bauingenieur 73 (1998) H. 1, S. 22-27.
- [2] Melbye, T.A.: Spritzbeton für die Felssicherung. MBT International Underground Construction Group, Zürich 1998.
- [3] Brux, G.: Einschaliger Tunnelausbau mit Spritzbeton. Neuerungen in der Spritzbetontechnologie: Alkalifreie Spritzbindemittel mit trockenen oder naturfeuchten Zuschlägen (Umweltfreundlicher Spritzbeton). Taschenbuch für den Tunnelbau 22(1998) S. 172-224, 62 Quellen.

- [4] **Richter, F.H.:**
Die Duktilität von Stahlfaserbeton - Sichtung verschiedener Standards. Heft 141, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, S.53-72, 1998.
- [5] **DBV (Hrsg.):**
Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons. Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. Faserbeton mit synthetischen organischen Fasern. Merkblätter, Deutscher Beton-Verein e.V. (DBV), Wiesbaden, Fassungen 1996 (1998).
- [6] **Falkner, H.; Teutsch, M.; Klinkert, H.:**
Leistungsklassen von Stahlfaserbeton. Heft 143, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig 1999.
- [7] **Stahldrahtfasern aus Edelstahl für Feuerfest-Beton:**
Dramix-Stahlfaserbeton. Bekaert Deutschland GmbH, Bad Homburg von der Höhe.
- [8] **Brux, G.:**
Verkehrstunnelbau mit Betonfertigteilen. Einschwimmteile, Senkkasten und Tübbings. Beton+Fertigteil-Jahrbuch 46(1998) S.164-183, insbes. 3.9 Tübbings aus Stahlfaserbeton.
- [9] **Meyeroltmanns, W.; Reher, R.:**
Zementgebundene Brandschutzplatten aus Glasfaserleichtbeton für den Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen. Tunnel 16 (1997) H.7, S.69-73.
- [10] **Teichmann, G.:**
Brandschutz in Tunnelbauwerken und unterirdischen Verkehrsanlagen (Brandschutzverkleidungen). Tunnel 17(1998) H.5, S.41-46.
- [11] **Richter, E.; Hosser, O.:**
Baulicher Brandschutz bei Verkehrstunneln in geschlossener und offener Bauweise. Heft 133, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, S.11-26, 1997.
- [12] **Paliga, K.; Richter, E.:**
Versuche und Analysen zum Brandschutz bei Tunnelschalen. Heft 133, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, S.27-40, 1997.
- [13] **EUREKA-Projekt EU 499, Firetun:**
Fires in Transport Tunnels. Studiengesellschaft für Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, 1996.
- [14] **Steinert, C.; Kordina, K.:**
Laborversuche an Tunnelauskleidungssystemen. Teil des FE-Vorhabens 'Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen. BMBF-Förderungs-Nr. RGS 8817 9/P145/06/85 Fortsetzung, Leipzig. MFPA Leipzig.
- [15] **Steinert, C.:**
Brandverhalten von Tunnelauskleidungen aus Spritzbeton mit Faserzusatz. Bauingenieur 73 (1998) H.1, S.29-34.
- [16] **Maidl, B.; Ortu, M.:**
Zum Beitrag von C. Steinert: Brandverhalten von Tunnelauskleidungen aus Spritzbeton mit Faserzusatz. Bauingenieur 1998/1. Bauingenieur 73(1998) H.12, S. 555-556.
- [17] **Brux, G.:**
Einschaliger Tunnelausbau mit Spritzbeton. Taschenbuch für den Tunnelbau 22(1998) S. 172-224, insbes. 5.3 - 5.5 (S.195-205).
- [18] **Deuse, Th.; Mann, K.; Rüßmann, F.:**
Neues Spritzbindemittel für die Verarbeitung naturfeuchter Zuschläge im Trockenspritzverfahren. Tunnel 17(1998) H.6, S.37-41.
- [19] **Brux, G.; Linder, R.; Ruffert, G.:**
Spritzbeton-Spritzmörtel-Spritzputz; Herstellung, Prüfung und Ausführung. Verlagsges. Rudolf Müller, Köln; insbes. 3.1.3 Beispiel einer Mischungsberechnung und des Rückpralls (S.34-38).
- [20] **Lukas, W.:**
Rückprall- und Staubbinderung bei modifiziertem Trockenspritzverfahren. Spritzbeton-Technologie, 5. Internat. Fachtagung, Innsbruck-Igls 1996, S. 77-81 Regelwerke.
- [21] **DIN 18 551:**
Spritzbeton. Herstellung und Güteüberwachung. Deutsches Institut für Normung, Berlin 1992.
- [22] **Richtlinie Spritzbeton:**
Anwendung und Prüfung. Österreichischer Betonverein, Wien. 10/1998 (Abschn. 10.2 Faserspritzbeton).
- [23] **Merkblätter:**
Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons. Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. Faserbeton mit synthetischen organischen Fasern. wie /5/

- [24] **Richtlinie 162/6:**
Stahlfaserbeton. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Sia), Zürich 1998.
- [25] **Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT):**
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1994.
- [26] **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Straßentunneln; Teil 1:**
Geschlossene Bauweise (Spritzbetonbauweise); ZTV-Tunnel. Bundesminister für Verkehr, Bund-/Länder-Fachausschuß Brücken- und Ingenieurbau, Bonn 1995.
- [27] **Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten.**
DS 853. Deutsche Bahn AG, Karlsruhe 1998.
- [28] **Ortu, M.; Maidl, 8.:**
Die Versuchseinrichtungen des Lehrstuhls für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb an der Ruhr-Universität Bochum auf dem Gebiet des Tunnelbaus. Bauingenieur 74 (1999) H.2, S.105-112.
- [29] **Fuzier, J. Ph.:**
Le béton projeté et la réparation du tunnel sous la Manche. Belgischer Betontag, 23.10.1997 in Brüssel; Bouwtechniek 10 (1997) H.10, S.22-28
- [30] **Kirkland, C.J.:**
De Brand in de Kanaaltunnel. Cement/NL 49 (1997) H.1, S.26-28.
- [31] **Brux, G.:**
Brand im Eurotunnel (im November 1996). Ursache, Schäden und Folgen. Tunnel 16 (1997) H.6, S.31-42 und Bautechnik 74 (1997) H.12, S.870-874.
- [32] **Brandschutz in Tunneln:**
Literaturdokumentation Nr.7115; 1985-1998. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau (IRB), Stuttgart, 1999.