

Frank Dehn
Normen Werther
Josef Knitl

Großbrandversuche für den City-Tunnel Leipzig

1 Einleitung

Als globales Schutzziel in Eisenbahntunneln gilt es, die Aufrechterhaltung der Trag- und Standsicherheit sowie die Funktion der Tunnelkonstruktion als Ganzes und ihrer Einzelbestandteile während und nach einem Brandereignis zu gewährleisten. Damit verbunden ist, daß vor allem bei einschaligen Tunnelbauwerken kein Risiko durch ein erhöhtes Betonabplatzen und somit, eine übermäßige Erwärmung der tragenden Bewehrung mit daraus resultierenden bleibenden Verformungen zu erwarten ist. Zudem soll auch nach dem Brandfall die Gebrauchstauglichkeit und eine wirtschaftliche Sanierung der brandbeanspruchten Bauteile mit möglichst geringem technischen, finanziellen und zeitlichen Aufwand möglich sein. In der letzten Zeit hat sich hierfür verstärkt der Einsatz von Betonen mit Kunststofffaserzusätzen herauskristallisiert.

Für den City-Tunnel Leipzig werden aus den oben genannten Gründen Stahlbetontübbinge mit Polypropylenfaserzusatz verwendet. Im Zuge

der unternehmensinternen Genehmigung (UIG) der DB AG und der Zustimmung im Einzelfall (ZiE) des Eisenbahnbundesamtes (EBA) wurden hierzu an der MFPA Leipzig umfangreiche Versuche an acht belasteten Tübbingen mit variierendem Fasergehalt im Originalmaßstab unter der sogenannten EBA-Brandkurve durchgeführt. Über diese Versuche wird nachfolgend berichtet.

2 Projekt City Tunnel Leipzig

Der Bau des City-Tunnels in Leipzig (CTL) stellt eine der wichtigsten Infrastrukturmaßnahmen in Ostdeutschland dar. Durch die Schaffung von zwei unterirdischen, jeweils eingleisigen Tunnelverbindungen für die Durchfahrt des Personennah- und -fernverkehrs erfolgt der Lückenschluß zwischen den beiden Leipziger Kopfbahnhöfen „Leipzig-Hauptbahnhof“ im Norden und „Bayrischer Bahnhof“ im Süden. Der gesamte Streckenabschnitt – einschließlich der vier in offener Bauweise erstellten unterirdischen Stationen, die die Anbindung zur Leipziger Innenstadt bil-

den – umfaßt eine Länge von ca. 5,2 Kilometern. Die Tunnelabschnitte mit zugehörigen Ein- und Ausfahrtsrampen haben eine Länge von rd. 3,9 Kilometern (Bild 1).

Beide aufzufahrenden Tunnelröhren liegen zwischen 8 m und 16 m unter GOK und werden in bergmännischer Bauweise mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine im Schildvortrieb aufgefahren. Sie besitzen einen Außendurchmesser von je 9 m und liegen im Abstand des Durchmessers auseinander. Der Ausbruchquerschnitt wird noch während des Schildvortriebs mit 1800 mm breiten und 400 mm dicken einschaligen Stahlbetontübbingringen ausgekleidet. Diese dienen nicht nur der Tragfähigkeit sondern fungieren gleichzeitig als endgültige Innenschale des Tunnels und gewährleistet auch die Abdichtung gegen anstehendes Grundwasser (Bild 1).

3 Brandschutztechnische Anforderungen an die Tübbinge

Bereits in der Entwurfs- und Ausschreibungsphase des City-Tunnels

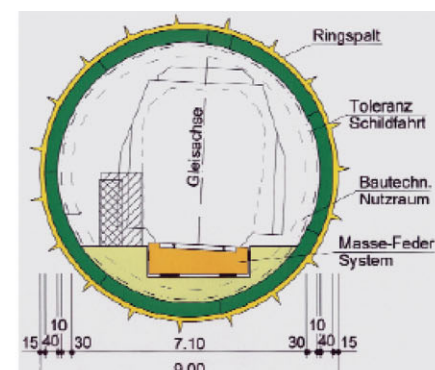
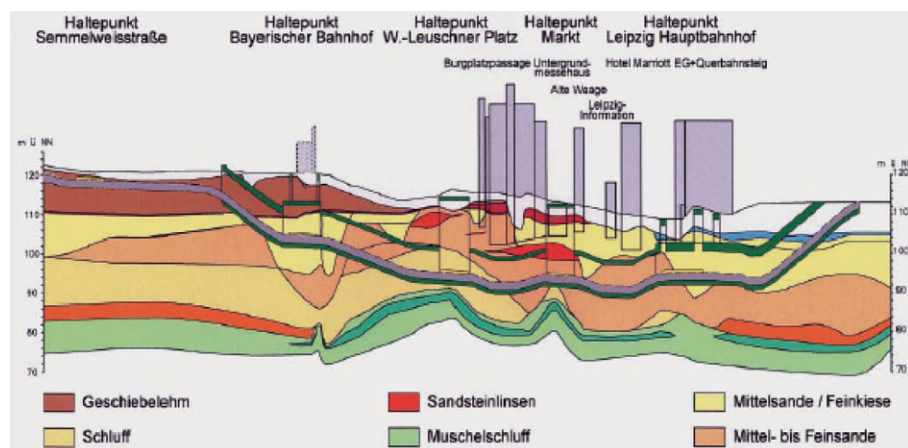


Bild 1. Längsschnitt und Regelquerschnitt City Tunnel Leipzig [1]

Leipzig wurden die brandschutztechnischen Anforderungen an die Tübbinge berücksichtigt und im Rahmen eines vorgeschalteten Brandschutzkonzeptes der Weg der Genehmigung aufgezeigt.

Angeregt durch die Untersuchungen der TU Wien und der Universität Leipzig [2] sowie der Versuche und Beiträge des IBMB der TU Braunschweig [3], [4] wurden im Vorfeld nur die Dicke der Tübbinge, deren Festigkeitsklasse und der Einsatz von Polypropylenfasern vorgeschrieben. In der Baubeschreibung, die auf eine projektbezogene Zustimmung im Einzelfall durch das Eisenbahnbundesamt (EBA) ausgerichtet war, wurden diese Anforderungen präzisiert und eine Eignungsprüfung der Tübbinge anhand von Großbrandversuchen vorgeschrieben. Hierzu wurde durch die Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig) eine Versuchsreihe an acht belasteten Stahlbetontübbingen mit unterschiedlichen Polypropylenfasergehalten durchgeführt. Die geforderten Versuchsgrundlagen waren wie folgt:

- Prüfung von acht Stahlbetontübbingen mit einem Polypropylenfaseranteil von 0, 2, 3 und 4 kg/m³ Beton, wobei jeweils zwei Tübbinge den gleichen Fasergehalt aufweisen sollten.
- Die Brandbeanspruchung erfolgte auf Grundlage der Temperatur-Zeit-Kurve des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA-Brandkurve).
- Während der Brandeinwirkungsdauer von 170 Minuten war eine Belastung der Tübbinge mit einer Normalkraft von 2600 kN/m zu gewährleisten.

Folgende Anforderungen wurden an die Tübbinge gestellt:

- Einhaltung der Vorgaben der ZTV-ING („Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauwerke – Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, 10.3. Brandschutzmaßnahmen für die Konstruktion“, Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, Fassung 01/03), worin eine Temperatur an der tragenden Bewehrung von 300 °C festgelegt wird.

Durch diese Beschränkung der Temperatur soll verhindert werden, daß eine Bewehrung, deren Stahlspannungen im Gebrauchszustand ca. 60% der Streckgrenze beträgt, während der Brandbeanspruchung große plastische Dehnungen erreicht und damit die Konstruktion im wiedererkalteten Zustand unvertretbar große bleibende Dehnungen aufweist.

- Beurteilung des Betonabplatzens der Versuchskörper nach den Anforderungen für einen Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit, sogenannte Faserbetonklasse BB 2, der Richtlinie Faserbeton der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) (Ausgabe März 2002), Abschnitt 6.2. Erhöhung der Brandbeständigkeit.

Bezogen auf einen Referenzbeton ohne Polypropylenfasern gilt dieses Kriterium als erfüllt, wenn mit Fasern modifizierte Betone eine auf den Referenzbeton massebezogene Abplatzmenge von kleiner 2,0% aufweisen.

An dieser Stelle muß angemerkt werden, daß für beide der vorgenannten Beurteilungskriterien normalerweise andere Temperatur-Zeit-Kurven sowie für die ÖVBB-Richtlinie standardisierte, unbelastete Kleinprüfkörper zugrunde gelegt werden müssen.

4 Konzeption der Versuche und Versuchsaufbau

Die Beurteilung der in Abschn. 3 beschriebenen Vorgaben und Anforderungen an die verschiedenen zur Auswahl stehende Betonrezepturen ließ sich realitätsnah nur in originalmaßstäblichen Bauteilversuchen vornehmen.

Die Beanspruchungen der Stahlbetontübbinge für die Untersuchungen leiteten sich aus den realistischen Einwirkungen auf den Tunnelquerschnitt (Tübbingring) ab. Diese ergeben sich aus der Überlagerung von äußeren statischen Lasten – wie Bauung, Erd- und Wasserdruck – und dem Brandszenario mit Abplatzungen und Querschnittsverringern des Betonquerschnitts sowie der Reduktion der Festig- und Steifigkeiten und der globalen Zwangsbeanspruchung aus der Temperaturdehnung. Tritt im Brandfall durch das umge-

benden Gebirge eine Verformungsbehinderung der thermischen Dehnung auf, entsteht eine globale Zwangsbeanspruchung im Tübbingring, die es im Vorfeld der Versuchskonzeption nach oben abzuschätzen und mit der statisch wirkenden Auflast zu überlagern galt.

Die Konzeption des Versuchszustandes und Wahl des zugehörigen statischen Systems ließ sich nunmehr aus diesen Überlegungen ableiten. Zudem war die lokale Zwangsbeanspruchung aus Temperatur bei den Großbrandversuchen auszuschließen. Die Wahl des Versuchsaufbaus beschränkte sich daher auf einen statisch-bestimmt gelagerten Zweigelenkbogen, der die auftretende Temperaturdehnung am System durch eine freiverschiebliche horizontale Lagerbedingung kompensiert.

Anhand dieser Vorüberlegungen wurde durch die MFPA Leipzig ein spezieller Versuchsofen mit entsprechender Brenner- und Belastungseinrichtung errichtet. Dieser Versuchsofen ist so variabel und flexibel gestaltet, daß alle gängigen Tübbinggeometrien unter Belastung sowie alle im Tunnelbau üblichen Temperatur-Zeit-Kurven gefahren werden können.

Die Beflammung der Tübbinge von der Unterseite erfolgte durch acht Dieselmotoren. Zur Belastung der Tübbinge mit einer hier vorgesehenen Normalkraft von 2600 kN/m dienten horizontal als auch vertikal je vier hydraulische Pressen mit lastverteilenden Stahltraversen, die während der gesamten Versuchsdauer die Belastung konstant hielten. Hierzu wurde in vertikaler Richtung eine Belastung von 4060 kN und in horizontaler Richtung eine Belastung von 4210 kN in den jeweilig zu prüfenden Tübbing eingetragen. Das Aufbringen der vertikalen und horizontalen Belastung erfolgte gleichzeitig schrittweise, jeweils direkt vor dem Brandversuch in Laststufen von 500 kN bis zur Prüflast. Zur Sicherung der horizontalen Verschieblichkeit zum Abbau der thermischen Zwangskräfte wurden im Bereich der Auflagerseiten der Tübbinge Gleitlager aus Teflon installiert. Bild 2 zeigt den Versuchszustand.

Zum Nachweis der Temperaturverteilung in den Stahlbetontübbingen während der Brandversuche wur-

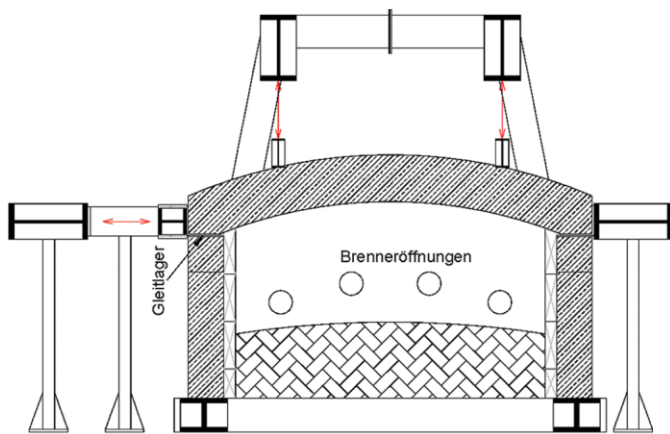


Bild 2. Darstellung des Versuchsstandes

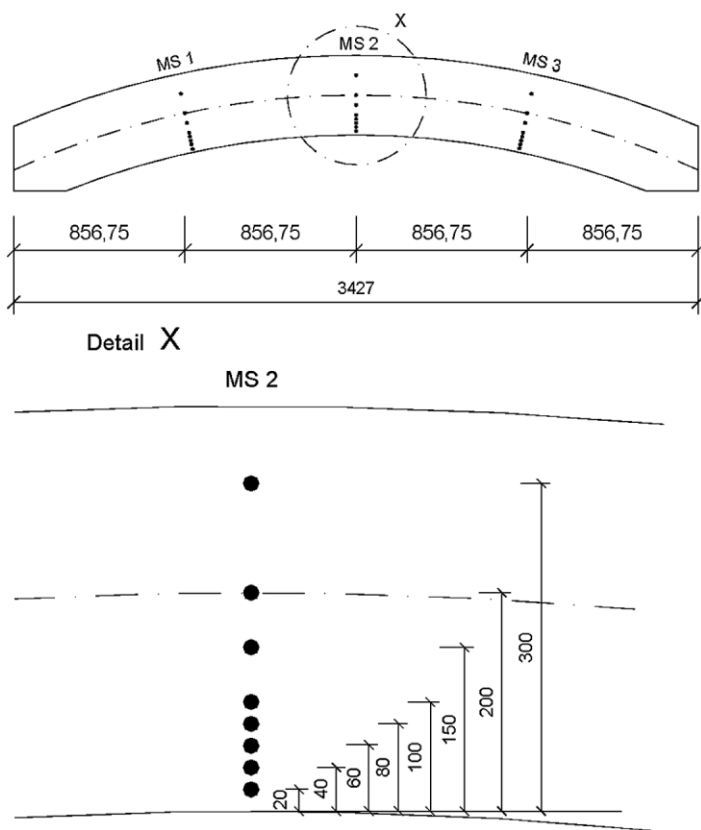


Bild 3. Anordnung der Temperaturmeßstellen (alle Angaben in [mm])

den in den Prüfkörpern jeweils an drei Meßstellen über die Längsachse der Tübbinge acht Meßpunkte in Tiefen von 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200 und 300 mm auf der brandzugewandten Seite vor dem Betonieren eingebracht (Bild 3). Zusätzlich wurden am Prüfkörper die horizontalen und vertikalen Verformungen gemessen, um ein aus großen Verformungen resultierendes Versagen des Prüfkörpers vorherzusehen. Zur Aufzeichnung der Verformungen der Tübbinge wurden während der Versuche je

zwei Wegaufnehmer zur Messung der vertikalen und horizontalen Verformung installiert.

5 Tübbingeometrie und Betontechnologie

Als Hersteller der Stahlbetontübbinge für den Tunnelausbau fertigte die Firma *Max Bögl* Bauunternehmung GmbH & Co. KG auch die acht Stahlbetontübbinge für die Großbrandversuche an. Die zu prüfenden Stahlbetontübbinge besaßen eine

Länge von 3427 mm, eine Breite von 1800 mm und eine Dicke von 400 mm. Der Radius des Segmentbogens betrug in der Systemachse 4150 mm. Die Gesamtmasse der Tübbinge wurde vor den Brandversuchen mit 6183 ± 5 kg ermittelt. Alle Tübbinge besaßen einen Bewehrungsanteil von je 357,3 kg aus BSt 500 S. Die Betondeckung betrug bei allen Prüfkörpern, entsprechend den Vorgaben der ZTV-ING, auf der beflamten Seite 60 mm. Auf der unbeflammten Seite wurde eine Betondeckung von 45 mm vorgesehen. Gemäß Mischungsentwurf besaßen die Tübbinge mit 0 und 2 kg/m^3 Polypropylenfasern eine Betonfestigkeitsklasse C 50/60 nach DIN 1045-2 / DIN EN 206-1. Die Tübbinge mit einem Faseranteil von 3 und 4 kg/m^3 Polypropylenfasern wiesen eine Betonfestigkeitsklasse C 45/55 nach DIN 1045-2 / DIN EN 206-1 auf. Die Tübbingebetonen wurden unter Verwendung eines Portlandzements CEM I, einer Flugasche sowie kalzitischen Gesteinskörnungen hergestellt. Als Faserzusatz kamen Polypropylenfasern mit einem Durchmesser von 0,16 mm und einer Länge von 6 mm zum Einsatz. Die Großbrandversuche an den Tübbingen erfolgten im Alter zwischen 35 und 43 Tagen. Die Betonfeuchten schwankten zwischen 2,2 und 3,2 M.-%.

6 Versuchsergebnisse

6.1 Tübbinge ohne Polypropylenfasern

Beide Tübbinge ohne Faserzusatz wiesen bereits in der Aufheizphase auf 1200 °C massive Abplatzungen



Bild 4. Tübbing ohne Polypropylenfaserzusatz nach dem Brandversuch

auf. Auf der Außenoberfläche der Tübbing waren bereits nach 40 Minuten zahlreiche Längs- und Querrisse, mit einer Riöffnung von ca. 0,5 mm vorhanden, aus denen Wasser austrat. Zum Teil waren diese Riöffnungen gegeneinander verschoben. Um einem möglichen Systemversagen entgegen zuwirken, wurde der erste Versuch nach 40 Minuten abgebrochen. Im zweiten Versuch wurde nach 60 Minuten die Entlastung vorgenommen, jedoch die Brandbeanspruchung bis zur 170. Minute fortgesetzt. In beiden Versuchen waren bereits nach 15 Minuten in Höhe der statisch wirksamen Bewehrung (60 mm Betondeckung) Temperaturen von ca. 1000 °C vorhanden, was auf ein vollständiges Abplatzen in diesem Bereich schließen lät. Auf den brandzugewandten Seiten zeigten sich nach den Versuchen massive Abplatzungen mit maximalen Tiefen von 340 mm (Bild 4).

6.2 Tübbing mit Polypropylenfasern (2, 3 und 4 kg/m²)

Bei den beiden Brandversuchen mit einem Polypropylenfaseranteil von 2 kg/m³ waren trotz des hohen Temperaturanstieges von 240 K/min in der Aufheizphase als auch im weiteren Verlauf der Brandbeanspruchung im Gegensatz zu den Versuchen ohne Fasern keine Abplatzungen hörbar. Auf den Tübbingoberflächen zeigten sich nur feine Längs- und Querrisse mit einer Riöffnung von ca. 0,1 mm, aus denen Wasser austrat. Die Belastung und Brandbeanspruchung erfolgte gemäß den Vorgaben bis zur 170. Minute. Schon während der Brandversuche war zu erkennen, daß die Temperaturen einer Metiefe nicht stark variierten, was auf eine

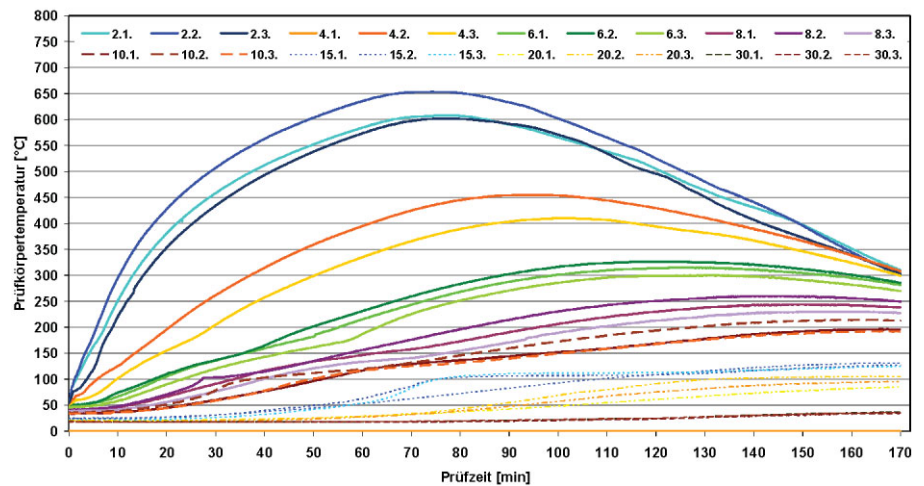


Bild 5. Temperaturen in und an den unterschiedlichen Mestiefen und -stellen für 2,0 kg/m³ Polypropylenfasern



Bild 6. Tübbing mit 2 kg/m³ Polypropylenfasern nach dem Brandversuch

gleichmäßige Erwärmung der Oberflächen schließen lät (Bild 5). Starke und ungleichmäßige Abplatzungen konnten somit schon während des Brandversuchs ausgeschlossen werden. Die Maximaltemperaturen von im Mittelwert ca. 312 °C in Höhe der tragenden Bewehrung trat erst nach Beendigung der vollen Brandbeanspruchung auf, d. h. bereits in der Abkühlkurve nach 125 Minuten, was auf die Wärmeleitung und das Wärmespeichervermögen des Betons zurückzuführen ist. Nach dem Abheben der Versuchskörper vom Prüfofen wurden oberflächige, ebene Abplatzungen von im Mittel ca. 15 mm Tiefe verzeichnet, wobei das Bruchbild einen gleichmäßigen Bruch durch Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung zeigt (Bild 6).

Bezogen auf die beiden Versuche mit 2 kg/m³ Polypropylenfasern konnte durch die Steigerung des Faseranteils von 3 bzw. 4 kg/m³ keine wesentliche Änderung bzw. Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden.

Die Versuchsbeobachtungen, Abplatztiefen und -mengen entsprachen weitgehend denen der Versuche mit 2 kg/m³. Abweichend dazu, traten mit zunehmendem Fasergehalt sogar zusätzliche Temperaturerhöhungen an der tragenden Bewehrung auf (Bild 7).

Die Beurteilung der Abplatzmengen zur Einstufung in die Faserbetonklasse BB2 der Richtlinie Faserbeton der ÖVBB erfolgte gravimetrisch über eine Massebestimmung. Dazu wurden die abgeplatzten Massen der Versuche ohne Polypropylenfasern ermittelt und als Referenz zu 100 % angenommen und als weitere Bewertungsgrundlage genutzt. Bezogen auf diesen Referenzwert wurden im Mittel 13,6 M.-% Abplatzungen ermittelt und damit der 2,0 M.-%-Wert deutlich überschritten.

Nach vollständiger Abkühlung war an allen Versuchskörpern ein leichtes nachträgliches Abfallen der brandbeanspruchten Oberflächen zu verzeichnen, was zum einen auf die

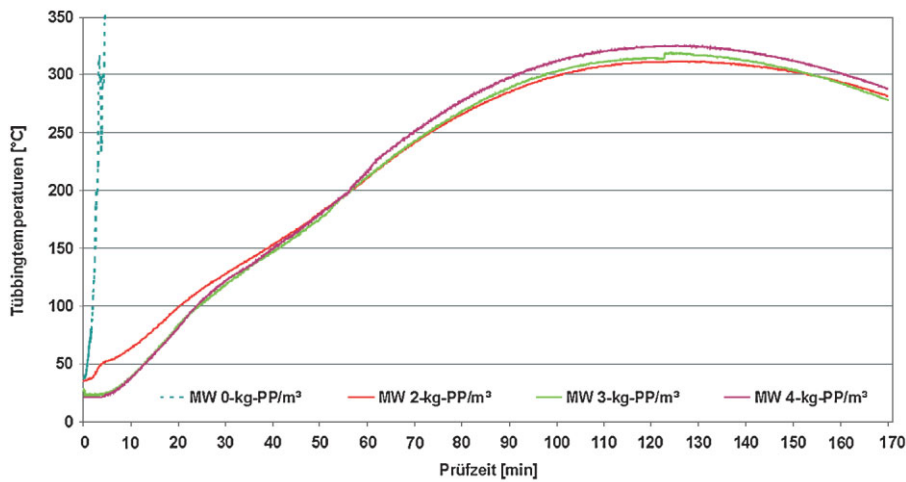


Bild 7. Mittelwerte der Temperaturerhöhungen in Höhe der Bewehrung (60 mm Betondeckung)

durch die Abkühlung entstehenden Temperaturspannungen als auch auf die Volumenvergrößerung der brandbeanspruchten kalzitischen Gesteinskörnung bei Reaktion mit der Luftfeuchtigkeit zurückzuführen ist.

7 Interpretation der Ergebnisse

Im Zuge der Aus- und die Bewertung der Großbrandversuche wurde deutlich, daß das „300 °C-Kriterium“ nach ZTV-ING in Höhe der tragenden Bewehrung sowie die Zuordnung zur Faserbetonklasse BB2 nach der Richtlinie Faserbeton der ÖVBB trotz der vermeintlich ausreichenden konstruktiven Maßnahme einer Betondeckung von 60 mm sowie die Verwendung von Polypropylenfasern nicht erfüllt werden konnte.

Die ausgewerteten Tiefenprofile machen jedoch deutlich, daß aufgrund der dem Beton eigenen Wärmeleitfähigkeit, fortschreitender Brandeinwirkung und Zeit, die maximalen Temperaturerhöhungen der fasermodifizierten Betone erst in der Abkühlphase auftreten und in einem Bereich zwischen 315 und 330 °C liegen. Bereits nach Beendigung der Versuche wurde die 300 °C-Isotherme wieder unterschritten.

Trotz der Temperaturüberschreitung traten in den Brandversuchen mit fasermodifiziertem Beton nur marginale horizontale und vertikale Verformungen auf. Relativierend muß an dieser Stelle angemerkt werden, daß bei einschaligen Tunnelbauwerken aus Tübbing die Stahl-

spannung der tragenden Bewehrung im Gebrauchszustand in der Regel $\leq 60\%$ der Streckgrenze beträgt, wodurch die Grenztemperatur, bei der im Brandfall bleibende Dehnungen auftreten, in Richtung höherer Temperaturen (> 400 °C) verschoben werden.

Wie erwähnt, erlaubte die Auswertung der Abplatzmengen der geprüften Versuchskörper keine Zuordnung zur Faserbetonklasse BB2 nach Richtlinie Faserbeton der ÖVBB. Gleichzeitig wird jedoch ersichtlich, daß trotz der Nichterfüllung des Leistungskriteriums der Faserbetonklasse BB2 eine deutliche Reduktion der Abplatzneigung im Vergleich zu den faserfreien Tübbing eintrat, was sich durch die Abplatztiefen und -mengen belegen läßt.

Auch wenn die geforderten Bewertungsgrundsätze nicht bzw. nicht vollständig erfüllt wurden, zeigt die Versuchsreihe mit fasermodifizierten und belasteten Tübbingbetonen jedoch, daß das Gesamtschutzziel – das Aufrechterhalten der Trag- und Standsicherheit – erreicht wurde. Zudem bleibt die Gebrauchstauglichkeit der Tunnelkonstruktion auch nach einer solchen Brandeinwirkung gewährleistet und eine Sanierung der brandbeanspruchten Oberflächen erscheint dadurch effizienter möglich zu sein.

8 Schlußbetrachtung

Das Brand- und Abplatzverhalten von Betonbauteilen stellt vor allem

bei Tunnelbränden mit ihrem schnellen Temperaturanstieg in den ersten Minuten ein erhebliches Schadenspotential und Sicherheitsrisiko dar. Der Einsatz von mit Polypropylenfasern modifizierten Betonen führt hier zu einer deutlichen Verbesserung.

Auch die Großbrandversuche an belasteten Stahlbetontübbing für den City-Tunnel Leipzig bestätigen dies. Jedoch können die im Zuge dieser Versuche gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres auf andere Projekte übertragen oder verallgemeinert werden. Diese gelten nur unter den Randbedingungen der hier beschriebenen Versuche, d. h. bei Berücksichtigung der gewählten Betonrezeptur, der Temperatur-Zeit-Kurve und der aufgebrachtten äußeren Lasten und Verformungen. Auf Grundlage der vorgenannten Ergebnisse kommt für den City-Tunnels Leipzig ein Tübbingbeton C 50/60 mit einem Polypropylenfasergehalt von 2 kg/m^3 Beton zur Anwendung [5].

Literaturverzeichnis

- [1] Franz, A. und Dehn, F.: City-Tunnel Leipzig: Brandversuche an Tübbing – Ermittlung der optimalen Betonzusammensetzung, EI – Eisenbahningenieur (57), Heft 05/2006, S. 26–30, Eurailpress Hamburg.
- [2] Schneider, U., König, G., Dehn, F. und Horwarth, J.: Versuche zum Brandverhalten von Tunnelinnenschalenbeton mit Faserzusatz, Bautechnik 78 (2001) Heft 11, S. 795–804, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [3] Dahl, J., Schaab, A., Richter, E. und Schnetgöke, R.: Brandprüfung zur Optimierung und Überprüfung von Schutzkonzepten für einschalige Tunnelauskleidungen, Tagungsband, Braunschweiger Brandschutz-Tage 2003.
- [4] Kordina, K.: Brände in unterirdischen Verkehrsanlagen, Bautechnik 80 (2003) Heft 5, S. 327–338, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [5] Dehn, F. und Werther, N.: Großbrandversuche an belasteten Stahlbetontübbing mit unterschiedlichem Polypropylenfasergehalt, Gutachterliche Stellungnahme GU III/B-05-042 vom 07.11.2005, MFPA Leipzig GmbH (unveröffentlicht).



Dr.-Ing. Frank Dehn
dehn@mfpa-leipzig.de
Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA Leipzig GmbH)
Hans-Weigel-Strasse 2B
04319 Leipzig



Dipl.-Ing. Norman Werther
werther@mfpa-leipzig.de



Dipl.-Ing. Josef Knitl
Max Bögl Bauunternehmung GmbH & Co. KG
Postfach 1120
92301 Neumarkt
jknitl@max-boegl.de