

Optimisation of Constructional Fire Protection of a Built-Over Underground Station Using Fire Simulation

Optimierung des baulichen Brandschutzes einer überbauten U-Bahnstation mittels Brandsimulation

According to the German tram regulations BOStrab [1], constructional fire protection for underground transport structures in urban areas has to be paid particular attention. In addition to endangering passengers and emergency services in case of fire, the loss of structural stability can also endanger adjoining buildings. In order to ensure the structural safety of the new urban transit line U81 to Düsseldorf Airport – which will later be built over – even in case of fire, a detailed investigation of fire protection was already carried out in the design phase by means of a fire simulation. In the course of the investigation, constructional details were determined for the structural elements, which exceed the minimum requirements of the tunnel guideline [2] with a fire resistance class of F90-A and fulfil the required fire protection.

Dem baulichen Brandschutz von unterirdischen Verkehrsbauwerken ist nach BOStrab [1] in innerstädtischen Gebieten eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Ein Verlust der Standsicherheit bei einem Brandereignis könnte zur Gefährdung der Nutzer und Rettungskräfte sowie der angrenzenden Bebauung führen. Um die Standsicherheit der neuen Stadtbahnlinie U81 zum Düsseldorfer Flughafen – die später überbaut werden soll – auch nach einem Brandfall zu gewährleisten, wurde bereits zur Entwurfsplanung eine vertiefende Untersuchung des Brandschutzes mittels einer Brandsimulation durchgeführt. Im Zuge der Untersuchung wurde eine konstruktive Ausbildung der tragenden Bauteile bestimmt, die über der Mindestanforderung der Tunnelrichtlinie [2] mit einer Feuerwiderstandsklasse von F90-A liegt und den erforderlichen Brandschutz erfüllt.

Dipl.-Ing., B.Sc. STEFAN REITENBERGER, Qualitätssicherung Tunnelbau/Quality assurance tunnelling, DEGES GmbH, Düsseldorf, Deutschland/Germany ¹
 Dipl.-Ing. FRANZ-HUBERTUS BECK, Prokurist/Authorized signatory, Zetcon Ingenieure GmbH, München, Deutschland/Germany ²
 M. Sc. JULIAN PARK, Brandschutzsachverständiger/ Fire protection expert, brandwerk traffic Ingenieurgesellschaft mbH, Essen, Deutschland/Germany
 M. Sc., M. Sc. ULLRICH. PICKERT, Brandschutzsachverständiger und Handlungsbevollmächtigter/ Fire protection expert and authorised representative, brandwerk traffic Ingenieurgesellschaft mbH, Essen, Deutschland/Germany
 Dipl.-Ing. TORSTEN HÖFIG, Abteilungsleiter Brücken-, Tunnel- und Stadtbahnbau, Amt für Verkehrsmanagement/ Head of Department for Bridge, Tunnel and Urban Railway Construction, Office for Traffic Management, Düsseldorf, Deutschland/Germany
 Dr.-Ing. JÖRG ERDMANN, e+b Erdmann Brandmann Beratende Ingenieure Partnerschaft mbB, baustatische Beratung/ structural consulting, Düsseldorf, Deutschland/Germany

1 Introduction and Objective

At Düsseldorf airport, the future line U81 will run through an underground section with a running tunnel and the underground station "Flughafen-Terminal" (Fig. 1). Since the underground station may be built over later with loads on the individual columns, which are still unknown and were therefore specified on the safe side, and because of the light and open design of the station structure, including a flat ceiling with widely spaced columns and slender central columns, the fire safety design of the structural elements was already investigated in detail during the early design stage to verify the protection aim "structural safety in case of fire".

The basis of the investigation using a fire simulation was the fact that possible fire loadings from vehicles are specific to types and therefore change in the course of time. Correspondingly a procedure was chosen, which considers

1 Einführung und Zielsetzung

Im Flughafenbereich Düsseldorf verläuft die zukünftige U81 in einem unterirdischen Abschnitt mit Streckentunnel und dem abschließenden U-Bahnhof „Flughafen-Terminal“ (Bild 1). Wegen einer möglichen späteren Überbauung des U-Bahnhofes mit noch unbekanntem und daher auf der sicheren Seite festgelegten Lasten für Einzelstützen sowie einer lichten und offenen Gestaltung des Haltestellenbauwerks, u. a. durch Ausbildung einer Flachdecke mit großen Stützweiten und schmalen Mittelstützen, wurde die brandschutztechnische Ausbildung der tragenden Bauteile bereits während des Entwurfs vertiefter untersucht, um das Schutzziel „Standsicherheit im Brandfall“ nachzuweisen.

Grundlage der Untersuchung mit Hilfe einer Brandsimulation bildete dabei die Tatsache, dass mögliche Brandbelastungen durch Fahrzeuge typenspezifisch sind und sich daher im Laufe

¹ Formerly Vössing Ingenieurgesellschaft mbH, sub-project manager „U81/1st construction phase (underground structures)“, Düsseldorf, Germany
 Ehemals Vössing Ingenieurgesellschaft mbH, Teilprojektleiter „U81/1. Bauabschnitt (unterirdische Bauwerke)“, Düsseldorf, Deutschland

² Formerly Vössing Ingenieurgesellschaft mbH, Head of Tunneling Department, Düsseldorf, Germany
 Ehemals Vössing Ingenieurgesellschaft mbH, Abteilungsleiter Tunnelbau, Düsseldorf, Deutschland



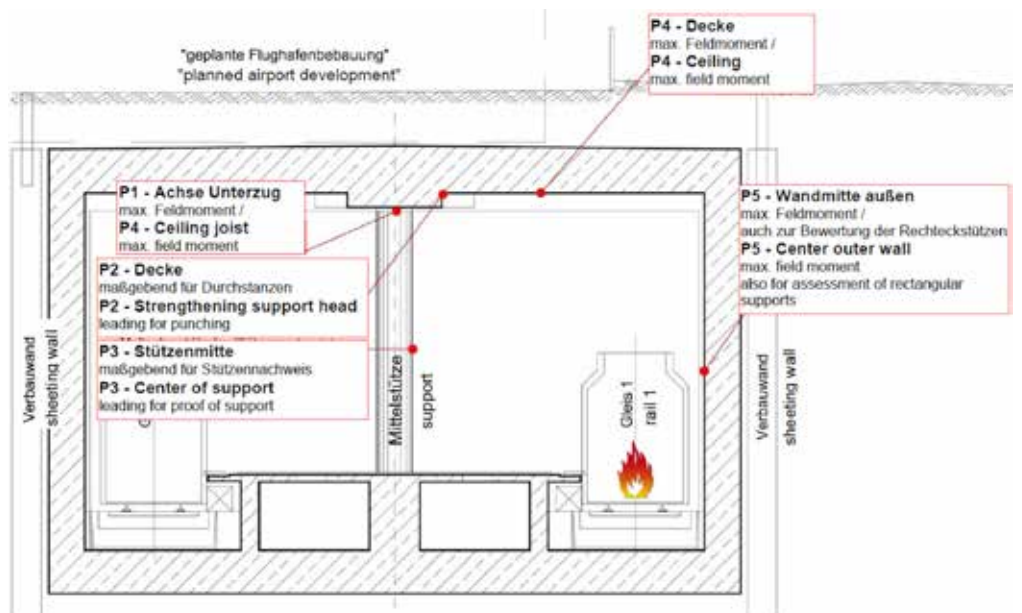
1 Visualization of the underground station „Terminal Flughafen“, U81 Düsseldorf

Credit/Quelle: Archilooks/sop Architekten

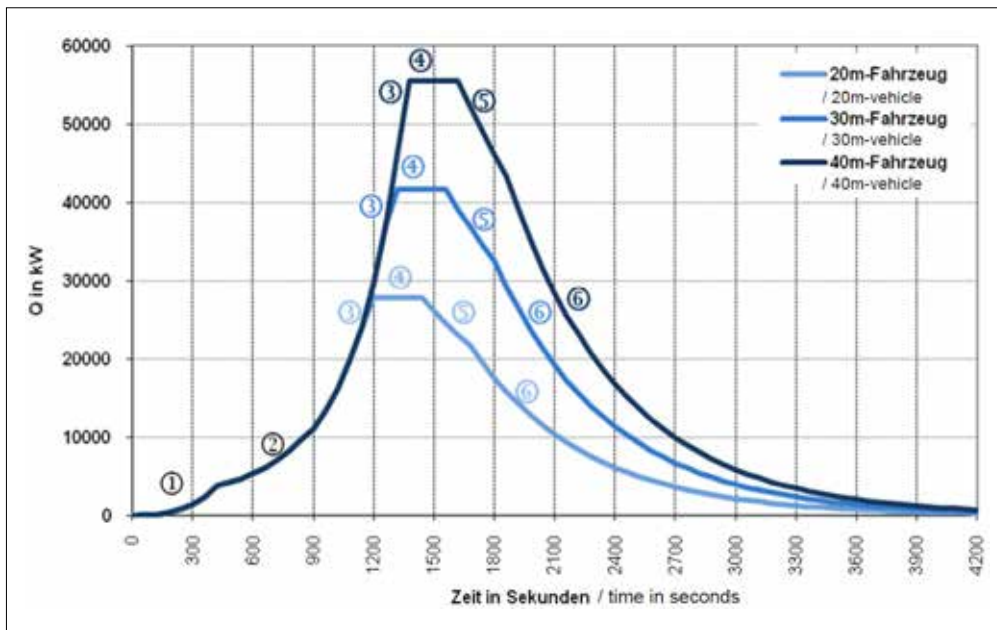
Visualisierung der unterirdischen Haltestelle „Terminal Flughafen“ der Linie U81 Düsseldorf

2 Cross section underground station with inspection points on structural components

Querschnitt des U-Bahnhofes mit Untersuchungspunkten an Bauteilen



Credit/Quelle: Vössing Ingenieurgesellschaft



Credit/Quelle: brandwerk traffic ingenieurgesellschaft

3 Fire curves for rail vehicles with different lengths according to TRStrab [3]

Brandverlaufskurven für Schienenfahrzeuge mit unterschiedlichen Längen nach TRStrab [3]

the protection aim of structural safety independent of vehicle type. This way, a temperature-time curve could be obtained using a design fire and then used for the structural design. In a multi-stage investigation process, first the constraints were specified for a fire simulation. As the decisive fire curve, full fire of a rail vehicle according to the TRStrab Brandschutz [3] (Technical rules for trams – fire protection) was chosen. From the fire simulation, the surface temperatures of the loadbearing elements were determined. From the point of view of the structural engineer, the critical points are the fire loadings on the highly loaded central columns with the column heads, the middle of the slab and the external wall. For these elements, the temperature measurement points 1 to 5 were specified for the fire simulation model (Fig. 2).

2 Determination of Surface Temperatures

2.1 Model Formation

Simulation programs often offer the possibility of deviating from the requirements of the technical building rules and undertaking an individual verification based on the protection aims. Despite complex interfaces and insufficient technical specifications, the questions posed here can be answered technically correct and satisfactorily in economic terms. In this investigation, an engineering process was used to determine the temperature development at the surface of the decisive elements using a natural fire curve. The surface temperatures provide the basis for the subsequent thermal analysis and structural assessment. For the investigation of the surface temperatures, the validated simulation program Fire Dynamics Simulator (FDS) was used.

der Zeit ändern. Entsprechend wurde eine Herangehensweise gewählt, die unabhängig vom Fahrzeugtyp das Schutzziel der Standsicherheit berücksichtigt. So konnte schließlich mittels des Bemessungsbrandes eine Temperatur-Zeit-Verlaufskurve erstellt werden, die für die Tragwerksplanung verwendet wurde. In einem mehrstufigen Untersuchungsprozess wurden zunächst die Randbedingungen für eine Brandsimulation festgelegt. Als maßgebliche Brandverlaufskurve wurde der Vollbrand eines Schienenfahrzeuges nach der TRStrab Brandschutz [3] gewählt. Aus den durchgeführten Brandsimulationen wurden die Oberflächentemperaturen der tragenden Bauteile bestimmt. Aus tragwerksplanerischer Sicht sind insbesondere die Brandbeanspruchungen der hochbelasteten Mittelstützen mit den Stützenköpfen, der Deckenmitte sowie der Außenwand von Bedeutung. Für diese Bauteile wurden die Temperaturmesspunkte 1 bis 5 für das Modell der Brandsimulation vorgegeben (Bild 2).

2 Ermittlung der Oberflächentemperaturen

2.1 Modellbildung

Simulationsprogramme bieten vermehrt die Möglichkeit, von den Vorgaben bzw. Anforderungen der technischen Baubestimmungen abzuweichen und durch einen individuellen Nachweis eine schutzzielorientierte Beurteilung vorzunehmen. Trotz komplexer Schnittstellen und nicht ausreichender technischer Festlegungen können somit die hier anstehenden Fragestellungen technisch richtig und zugleich wirtschaftlich gelöst werden. Bei dieser Untersuchung wurde mithilfe ingenieurmäßiger Verfahren die Temperaturentwicklung an den Oberflächen der maßgeblichen Bauteile mittels einer Naturbrandkurve ermittelt. Die Oberflächentemperaturen bilden die Grundlage für die anschließende thermische Analyse bzw. konstruktive Bewertung.

In the course of the preliminary considerations, a fire to a rail vehicle was decided as the decisive fire event and agreed with those involved with the design. The fire curve used was the conservative vehicle fire according to the technical rules for trams (TRStrab) for a 30 m long train. The fire curve can be seen in **Fig. 3**.

Furthermore, the specific material parameters of the individual components of the decisive travelling rail vehicle B80-C were implemented in the simulation model. In this way local temperature effects depending on the component could be represented and temperature- or material-dependent failure criteria could be stored.

2.2 Input Parameters of the Simulation

In the course of the preliminary investigations, general constraints were first decided. In addition to modelling of the structure, the train was represented realistically (including the materials and their specific parameters) in the cell grid of the calculation model. Particular attention was paid here to the failure times of the existing windows, since a significant part of the thermal energy escapes through the resulting window openings. In the course of the preliminary investigations, an approach on the safe side according to Kunkelmann [9] was followed, that assumes failure of the panes on reaching a threshold temperature. The result was that when the windows failed, flames came out of the vehicle and localised temperature peaks occurred to the tunnel walls in the immediate vicinity.

To ensure sufficient safety in the transfer of the calculation results to a simulation program, the adiabatic surface

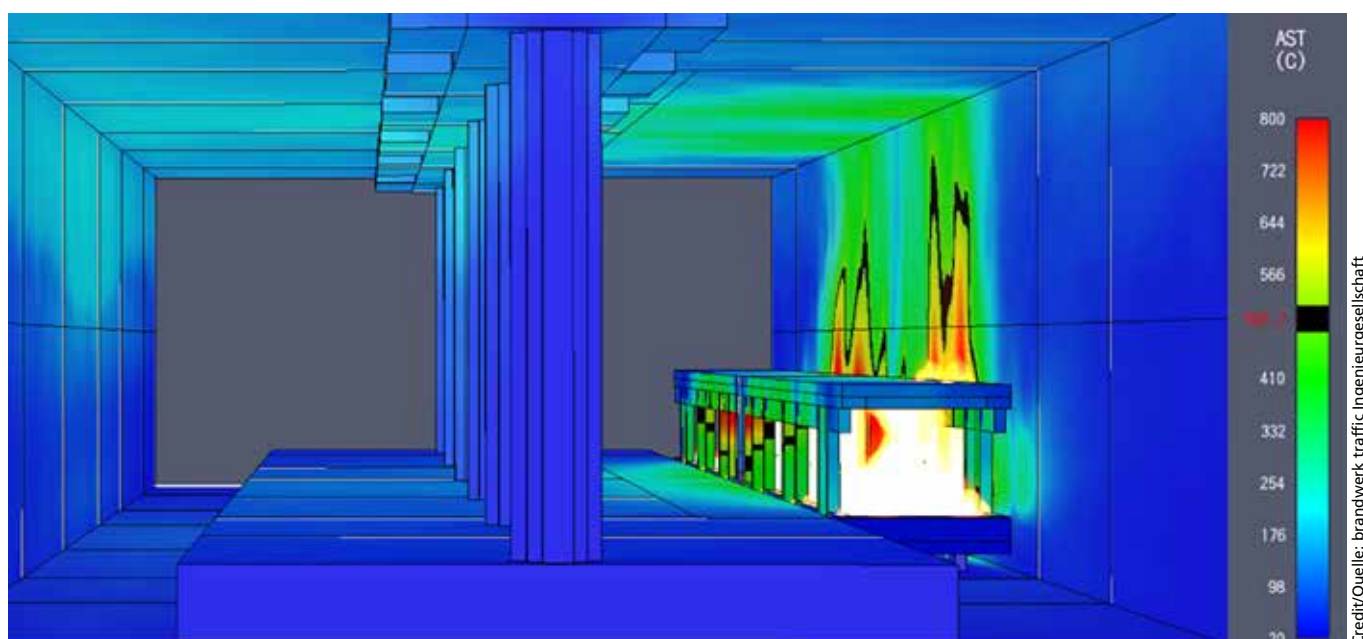
Für die Untersuchung der Oberflächentemperaturen wurde das validierte Simulationsprogramm Fire Dynamics Simulator (FDS) verwendet. FDS ist eine international weit verbreitete CFD-Software zur Simulation von Brandereignissen.

Im Rahmen von Vorüberlegungen wurde als maßgebliches Schadensereignis der Brand eines Schienenfahrzeuges festgelegt und mit den Planungsbeteiligten abgestimmt. Als Brandverlaufskurve wurde der konservative Fahrzeugbrand nach den Technischen Regeln Straßenbahnen (TRStrab) für ein 30 m langes Fahrzeug herangezogen. Die Brandverlaufskurve kann aus **Bild 3** entnommen werden.

Zudem wurden die spezifischen Materialkennwerte der einzelnen Bauteile des maßgeblich verkehrenden Schienenfahrzeuges B80-C in das Simulationsmodell implementiert. So können lokale bauteilabhängige Temperatureffekte abgebildet und temperatur- bzw. materialabhängige Versagenskriterien hinterlegt werden.

2.2 Eingangsparameter der Simulation

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden zunächst allgemeine Rahmenbedingungen festgelegt. Neben der Modellierung des Bauwerks wurde das Schienenfahrzeug realitätsnah (inklusive der verwendeten Materialien und deren spezifischer Kennwerte) innerhalb des gewählten Zellgitterrasters im Rechenmodell abgebildet. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den Versagenszeitpunkten der Fensterflächen, da durch die entstehenden Fensteröffnungen ein maßgeblicher Teil der Wärmeenergie austritt. Bei den Voruntersuchungen wurde dabei ein konservativer Ansatz nach Kunkelmann [9] verfolgt, der bei Erreichen einer Grenztemperatur ein Versagen der Scheibenflächen mitberücksichtigt. Als Ergebnis zeigte sich,



4 Evaluation of the adiabatic surface temperatures for an exemplary time step
Auswertung der adiabaten Oberflächentemperaturen für einen exemplarischen Zeitschritt

temperature was used to determine the thermal transport in the decisive elements. This value neglects thermal transport into the element and thus represents the thermal energy acting on the surface almost without losses. Therefore higher calculated temperatures are produced at the surface.

2.3 Results for Surface Temperatures

In the overall analysis for the determination of the element temperatures, numerous measurement locations were evaluated in the model. **Fig. 4** shows an example evaluation time with illustration of the adiabatic surface temperatures in a tunnel section. It can be seen that several windows have already failed.

The scale shown at the right-hand side (20 °C to 800 °C) enables a visual analysis of the prevailing surface temperatures (with a surface temperature of about 500 °C shown in black). It shows that due to the failure of window panes, the highest temperatures of up to about 1100 °C are found at the wall surfaces in the immediate vicinity of the train.

A great difference could be determined between the surface temperatures at the columns in comparison with the roof slab elements. Direct comparison of the measurement equipment at the relevant columns shows that the vehicle construction and its element-dependent material properties have a significant effect on the occurring surface temperatures. For example, a temperature difference of up to about 25 % arose at the various columns along the train.

Due to the stated variance at the different measurement locations, the use of maximum values at the relevant elements is generally recommended so that local flow and temperature effects can be taken into account with adequate reliability. **Fig. 5** shows the determined temperature-time curves for the station area (cf. **Fig. 2**) compared to curves from standards.

From this it can be seen that the measured surface temperatures over the course of time exceed the ISO curve (DIN 4102-1; Johannes Horvath [10]), also called *Einheitstemperaturkurve* ETK.

Therefore it could be verified that due to the assumed design fire, higher short-term temperatures (cf. **Fig. 5**, time period 1200–2000 seconds) occur than with the standard fire curve ETK. Related to the overall investigation period, however, the thermal loading is lower.

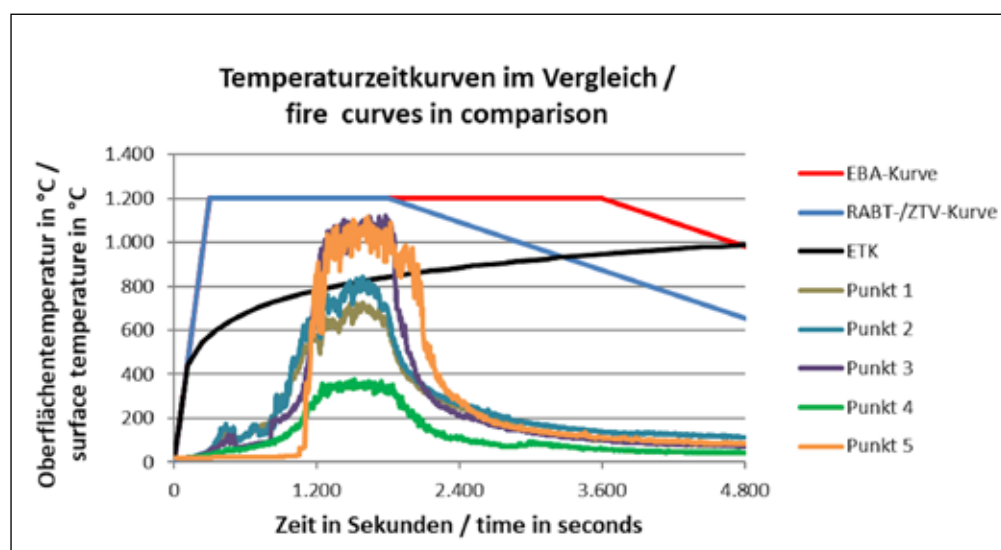
dass bei Versagen der Fensterflächen die Flammen aus dem Fahrzeug herausschlagen und in unmittelbarer Nähe zu den Tunnelwänden örtlich begrenzte Temperaturspitzen auftraten. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit bei der Übergabe der Berechnungsergebnisse in ein Simulationsprogramm wurde zur Bestimmung des Wärmetransportes in die maßgeblichen Bauteile die adiabate Oberflächentemperatur abgegriffen. Bei diesem Wert wird der Wärmetransport in das Bauteil vernachlässigt, so dass mit dieser Kenngröße die vollständig auf die Oberfläche einwirkende Wärmeenergie nahezu verlustfrei dargestellt wird. Somit werden rechnerisch höhere Temperaturen an der Oberfläche erzeugt.

2.3 Ergebnisse Oberflächentemperaturen

Innerhalb der gesamten Analyse zur Ermittlung der Bauteiltemperaturen wurde eine Vielzahl von Messstellen im Modell ausgewertet. **Bild 4** zeigt einen beispielhaften Auswertungzeitpunkt mit Darstellung der adiabaten Oberflächentemperaturen innerhalb eines Tunnelabschnitts. Erkennbar ist, dass bereits mehrere Fensterflächen versagt haben.

Anhand der rechtsseitig abgebildeten Skala (20 °C bis 800 °C) ist eine visuelle Analyse der vorhandenen Oberflächentemperaturen möglich (schwarz dargestellt ist dabei eine Oberflächentemperatur von etwa 500 °C). Es zeigt sich, dass durch das Versagen der Fensterflächen im unmittelbaren Nahbereich des Zuges an den Wandflächen die höchsten Temperaturen von bis zu ca. 1100 °C vorliegen.

Es konnte eine hohe Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen an den Stützen im Vergleich zu den Deckenelementen festgestellt werden. Im direkten Vergleich der Messeinrichtungen an den jeweiligen Stützen zeigt sich, dass die Fahrzeugkonstruktion und deren bauteilabhängige Materialbeschaffenheit erheblichen Einfluss auf die auftretenden Oberflächentemperaturen



5 Representation of nominal and simulated temperature curves
Darstellung von nominalen und simulierten Temperaturverlaufskur-

3 Element-Related Evaluation of the Simulation Results

3.1 Thermal Analysis of Construction Elements

For the thermal analysis according to DIN EN 1992-1-2 of the elements from Fig. 2, the transferred adiabatic temperature curves were prepared and the temperature development in the relevant elements was determined with the program Infocad and the additional module for structural analysis in case of fire.

Using the temperature curve with time, the evaluation procedure can be specified according to DIN EN 1992-1-2 [6]. For heating rates of between 2 K/min and 50 K/min, the material models for higher temperatures according to DIN EN 1992-1-2 can be used.

It shows that elements away from the fire location (central columns and roof slab) experience heating rates in the range according to standard, in contrast to the external wall immediately next to the train. The latter shows a very rapid temperature increase rate at the surface of max. 206 K/min (Fig. 6). However the heating rates are already in the range of the material models of DIN EN 1992-1-2 at a depth of 2 cm into the element.

The temperature profiles make clear that short-term high temperatures of the adiabatic curve are indeed reached at the surface of the elements. However the

haben. Beispielhaft hat sich an den unterschiedlichen Stützen entlang des Schienenfahrzeugs eine Temperaturdifferenz von bis zu ca. 25 % im Maximum eingestellt.

Aufgrund der genannten Varianz an den unterschiedlichen Messstellen empfiehlt sich allgemein die Verwendung der Maximalwerte an den jeweiligen Bauteilen, so dass lokale Strömungs- und Temperatureffekte mit einer ausreichenden Zuverlässigkeit berücksichtigt werden können. In Bild 5 werden ermittelte Temperaturzeitkurven für den Haltestellenbereich (vgl. Bild 2) normierten Verlaufskurven exemplarisch gegenübergestellt. Hieraus lässt sich erkennen, dass die gemessenen Oberflächentemperaturen die ISO-Kurve (DIN 4102-1; Johannes Horvath [10]), auch Einheitstemperaturkurve ETK genannt, deutlich im zeitlichen Verlauf übersteigen.

Somit konnte nachgewiesen werden, dass durch den angesetzten Bemessungsbrand kurzzeitig höhere Temperaturen (vgl. Bild 5, Zeitraum Sekunde 1200 bis etwa Sekunde 2000) als bei der normierten Brandverlaufskurve ETK entstehen. Bezogen auf den gesamten Untersuchungszeitraum fällt die thermische Belastung jedoch niedriger aus.

3 Bauteilbezogene Auswertung der Simulationsergebnisse

3.1 Thermische Bauteilanalyse

Zur thermischen Analyse nach DIN EN 1992-1-2 der Bauteile aus Bild 2 wurden die übergebenen adiabaten Temperaturkur-

1) keine nennenswerten Temperaturentwicklungen
1) no significant development of temperature

P4 - Bahnhofsoberfläche / station ceiling

Dauer / duration	Temperatur [°C] in Bauteiltiefe / Temperature [°C] in component depth				
	0 cm	2 cm	6 cm	12,5 cm	120 cm
0 min	20	20	20	20	1)
5 min	30	20	20	20	
20 min	350	50	22	20	
30 min	350	100	30	22	
35 min	150	120	45	24	
50 min	70	90	62	27	
80 min	45	60	55	35	
100 min	40	50	50	36	

P5 - Bahnhofsaußenwand / station outer wall

Dauer / duration	Temperatur [°C] in Bauteiltiefe / Temperature [°C] in component depth					
	0 cm	2 cm	6 cm	12,5 cm	25 cm	100 cm
0 min	20	20	20	20	20	1)
15 min	20	20	20	20	20	
20 min	1050	50	20	20	20	
30 min	1050	310	65	20	20	
35 min	550	400	80	22	20	
50 min	190	285	155	34	20	
80 min	90	160	140	62	21	
100 min	60	120	110	72		

Dauer / duration	Erwärmungsrate [K/min] in Bauteiltiefe / heating rate [K/min] in component depth				
	0 cm	2 cm	6 cm	12,5 cm	120 cm
0 - 5 min	2,0	0,0	0,0	0,0	1)
5 - 20 min	21,3	2,0	0,1	0,0	
20 - 30 min	0,0	5,0	0,8	0,2	
30 - 35 min	-40,0	4,0	3,0	0,4	
35 - 50 min	-5,3	-2,0	1,1	0,2	
50 - 80 min	-0,8	-1,0	-0,2	0,3	
80 - 100 min	-0,3	-0,5	-0,3	0,1	

Dauer / duration	Erwärmungsrate [K/min] in Bauteiltiefe / heating rate [K/min] in component depth					
	0 cm	2 cm	6 cm	12,5 cm	25 cm	100 cm
0 - 15 min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1)
15 - 20 min	206,0	6,0	0,0	0,0	0,0	
20 - 30 min	0,0	26,0	4,5	0,0	0,0	
30 - 35 min	-100,0	18,0	3,0	0,4	0,0	
35 - 50 min	-24,0	-7,7	5,0	0,8	0,0	
50 - 80 min	-3,3	-4,2	-0,5	0,9	0,0	
80 - 100 min	-1,5	-2,0	-1,5	0,5	-1,1	

6 Development of temperatures and heating rate of the tunnel ceiling (p4, left) and outer wall (p5, right)
Temperaturentwicklung und Erwärmungsrate der Tunneldecke (P4, links) und Außenwand (P5, rechts)



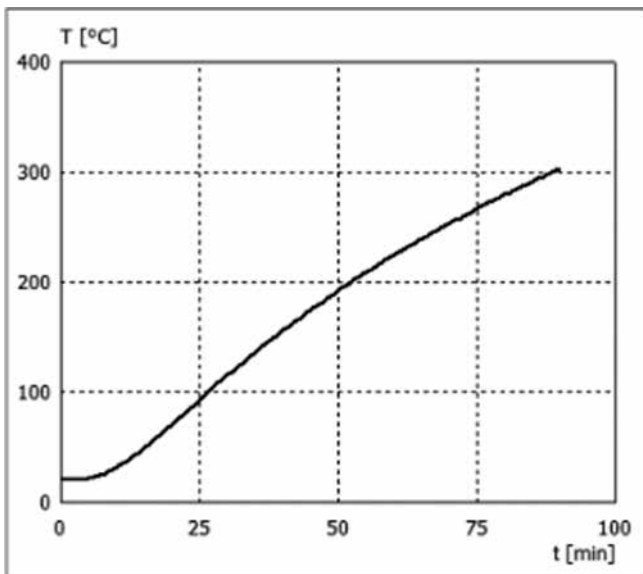
Wir sind
Pioniere.
Wegefinder.
Weiterdenker.

Mit Kompetenz im Rücken,
die Zukunft im Blick.

zetcon.de

ZETCON
INGENIEURE

Credit/Quelle: Vössing Ingenieurgesellschaft



Credit/Quelle: Vössing Ingenieurgesellschaft

7 Temperature curve over 90 minutes after ETK in 6 cm component depth
Temperaturverlaufskurve über 90 Minuten nach ETK in 6 cm Bauteiltiefe

maximum temperatures 2 cm deep into the element only reach 400 °C and at 6 cm depth only a maximum of 155 °C, and thus lie clearly under the critical steel temperature of 300 °C according to ZTV-ING [8].

If the structural reinforcement is placed with 6 cm concrete cover in accordance with the ZTV-ING, a critical reduction of strength in case of fire is not to be expected in any element. This specification for the construction elements therefore fulfils the requirements of DIN EN 1992-1-2 (tabular process) and thus also the BOStrab tunnel guideline.

3.2 Comparison of the Results of the Fire Model With ETK-90

The assessment basis of constructional fire protection for elements according to the standard is the nominal standard temperature curve, which describes an artificial fire proceeding with digressively increasing energy liberation over time (Fig. 5). The resistance of construction elements against fire action is evaluated through the exposure time according to the ETK. So R90 represents the resistance of an element against the part of the ETK from 0 to 90 minutes (here ETK-90).

The thermal analysis of the ETK-90 fire curve gives considerably higher temperatures in the element than the fire curve determined for this project. The reinforcement at a depth of 6 cm would heat up to about 300 °C after 90 minutes (Fig. 7), which is clearly above the temperature from the fire simulation. The ETK-90 exposure therefore represents a considerably less favourable exposure for the element and lies on the safe side for usual tunnel structures according to BOStrab.

ven aufbereitet und die Temperaturentwicklung in den jeweiligen Bauteilen mit dem Programm Infocad und dem Zusatzmodul zur „Tragwerksanalyse für den Brandfall“ bestimmt.

Anhand des Temperaturverlaufs über die Zeit lässt sich das Bewertungsverfahren nach DIN EN 1992-1-2 [6] festlegen. Für Erwärmungsgeschwindigkeiten oder -raten zwischen 2 K/min und 50 K/min können die Materialmodelle für höhere Temperaturen gem. DIN EN 1992-1-2 verwendet werden.

Es zeigte sich, dass vom Brandort entfernter liegende Bauteile (Mittelstützen und Decke) Erwärmungsgeschwindigkeiten im Normbereich erfahren im Gegensatz zu der unmittelbar neben dem Fahrzeug befindlichen Außenwand. Letztere weist einen sehr schnellen Temperaturanstieg an der Oberfläche von max. 206 K/min auf (Bild 6). Allerdings liegen die Erwärmungsgeschwindigkeiten bereits in 2 cm Bauteiltiefe im Bereich der Materialmodelle der DIN EN 1992-1-2.

Die Temperaturprofile machen deutlich, dass zwar auf den Oberflächen der Bauteile die kurzzeitig anstehenden hohen Temperaturen der adiabaten Temperaturkurven erreicht werden. Allerdings erreichen die maximalen Temperaturen in 2 cm Bauteiltiefe nur noch 400 °C und in 6 cm Tiefe nur noch maximal 155 °C, die somit deutlich unterhalb der kritischen Stahltemperatur von 300 °C gemäß ZTV-ING [8] liegen.

Bei Einbau der tragenden Bewehrung mit 6 cm Betondeckung entsprechend ZTV-ING ist in keinem Bauteil eine kritische Tragfähigkeitsminderung im Brandfall zu erwarten. Diese Vorgabe der Bauteile erfüllt somit die Anforderungen der DIN EN 1992-1-2 (tabellierte Verfahren) und der BOStrab-Tunnelrichtlinie.

3.2 Vergleich der Ergebnisse des Brandmodells mit ETK-90

Bewertungsgrundlage des baulichen Brandschutzes für Bauteile nach dem Regelwerk stellt die nominelle Einheitstemperaturkurve dar, die einen künstlichen Brandverlauf beschreibt mit über die Zeit degressiv zunehmender Energiefreisetzung (Bild 5). Der Widerstand von Bauteilen gegenüber einer Brandeinwirkung wird durch die zeitliche Beanspruchungsdauer entsprechend der ETK bewertet. So steht R90 für den Widerstand eines Bauteils gegenüber dem ETK-Ausschnitt von 0 bis 90 Minuten (hier ETK-90).

Die thermische Analyse der ETK-90 Brandkurve ergibt deutlich höhere Temperaturen im Bauteil als die für dieses Projekt ermittelte Brandkurve. Die Bewehrung in 6 cm Tiefe würde sich nach 90 Minuten auf etwa 300 °C erwärmen (Bild 7), was deutlich über der Temperatur aus der Brandsimulation liegt. Die ETK-90 Beanspruchung stellt also für die Bauteile eine wesentlich ungünstigere Beanspruchung dar und liegt für übliche Tunnelbauwerke nach BOStrab auf der sicheren Seite.

4 Schlussfolgerungen für den baulichen Brandschutz

Auf Grund der geführten Untersuchungen konnten folgende konstruktive Festlegungen für das Projekt getroffen werden:

4 Conclusions for Structural Fire Protection

Based on the investigations that were carried out, the following constructional decisions could be made for the project:

- The concrete cover in all loadbearing elements is specified not as given in DIN 4102-4 [7] but according to the ZTV-ING with 6 cm.
- Application of surface reinforcement according to DIN EN 1992-1-2 or N-94 mesh or PP fibres according to the older or current ZTV-ING in the roof slab will be omitted since large-area spalling (maximum temperature about 200 °C at a depth of 4 cm in the element) due to slight construction moisture is improbable according to [6]. Furthermore, the investigated surface temperatures only describe locally occurring maximum values.
- In order to take into account internal temperature-dependent stress constraints in the elements from the design case fire, the simplified verification according to ZTV-ING is suitable. This can be based on the actually exposed areas of the elements.
- The performance of hot design in the course of the design for construction can also be omitted from the viewpoint of the preliminary investigation.

The additional investigations led to a reliable, reasonable design for constructional fire protection with the agreement of all involved parties. The constructional measures lead to an economic design with verified structural stability in case of fire.

In the revision of the tunnel guideline, it would be desirable to include indications under which usual constraints (e.g. the use of usual rolling stock concepts, no unusual fire exposure due to special use etc.) the minimum requirements for fire protection (F90-A) are sufficient for loadbearing elements. If there are special local conditions, e.g. buildings above the structure, the specification of a generally valid fire curve or a reference to the fire curves of the TRStrab Brandschutz for more detailed investigations using a fire simulation would be helpful.

- Die Betondeckung in allen tragenden Bauteilen wird abweichend zur DIN 4102-4 [7] entsprechend der ZTV-ING mit 6 cm gewählt.
- Auf die Einbringung von Oberflächenbewehrung nach DIN EN 1992-1-2 oder N-94-Matten bzw. PP-Fasern nach alter bzw. aktueller ZTV-ING in den Decken wird verzichtet, da großflächige Abplatzungen (Maximaltemperatur etwa 200 °C in 4 cm Bauteiltiefe) in Folge einer geringen Bauteilfeuchte nach [6] unwahrscheinlich sind. Zudem beschreiben die untersuchten Oberflächentemperaturen nur lokal auftretende Maximalwerte.
- Zur Berücksichtigung innerer, temperaturabhängiger Spannungszwänge in den Bauteilen aus dem Brandlastfall eignet sich der vereinfachte Nachweis nach ZTV-ING. Dieser kann auf die tatsächlich beanspruchten Flächen der Bauteile angesetzt werden.
- Auf die Durchführung von Heißbemessungen im Zuge der Ausführungsplanung kann aus Sicht der durchgeführten Voruntersuchung verzichtet werden.

Die zusätzlichen Untersuchungen führten zu einer belastbaren und angemessenen Planung des baulichen Brandschutzes im Einvernehmen aller Beteiligten. Die getroffenen konstruktiven Maßnahmen führen zu einem wirtschaftlichen Bauwerksentwurf mit nachgewiesener Standsicherheit im Brandfall.

Wünschenswert bei der Fortschreibung der Tunnelrichtlinie wären Hinweise, unter welchen üblichen Randbedingungen (z. B. Verwendung üblicher Fahrzeugkonzepte, keine außergewöhnlichen Brandlasten infolge besonderer Nutzungen etc.) die Mindestanforderung bzgl. des Brandschutzes (F90-A) für tragende Bauteile ausreichend sind. Bei Vorliegen besonderer Randbedingungen, wie z. B. einer Überbauung, wäre die Vorgabe einer allgemeingültigen Brandkurve oder der Verweis auf die Brandkurven der TRStrab Brandschutz für vertiefte Untersuchungen mittels einer Brandsimulation hilfreich.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] BMVI: Verordnung über den Bau und Betrieb von Straßenbahnen (Straßenbahn Bau- und Betriebsordnung – BOSTrab), 16.12.2016.
- [2] BMVI: Richtlinie für den Bau von Tunneln nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOSTrab-Tunnelbau-RL), Verkehrsblatt B3066; 1991.
- [3] BMVI: Technische Regeln von Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz), Verkehrsblatt, 24.06.2014.
- [4] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung (inkl. NA), 2010-12.
- [5] DIN EN 1991-1-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke: Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke (inkl. Berichtigung und NA), 2010-12.
- [6] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall (inkl. Berichtigung und NA), 2010-12.
- [7] DIN 4102 (Reihe): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teile 1 bis 4.
- [8] ZTV-ING: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen – Ingenieurbau, BAST, Stand 04/2019.
- [9] Kunkelmann, Jürgen: Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2013.
- [10] Horvath, Johannes; Schneider, Ulrich: Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Brandverhalten. Brandschutzmaßnahmen. Sanierung. Mit Projektbeispielen, Beuth Verlag, 2006