

# Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

## Brandschutzsachverständige

## Feuer- und Rauchgassimulation

<b>Bauvorhaben</b>	Hermann-Hesse-Bahn Wiederinbetriebnahme der Strecke Weil der Stadt - Calw
<b>Auftraggeber / Entwurfsverfasser</b>	Mailänder Consult GmbH Herr Markus Reinacher Mathystraße 13 76133 Karlsruhe
<b>Bauherr</b>	Zweckverband Hermann-Hesse-Bahn c/o Landratsamt Calw Vogteistraße 42-46 75965 Calw
<b>Ersteller</b>	Dr.-Ing. Anne Kawohl
<b>Projektnummer</b>	5285
<b>Datum</b>	21.06.2019

Diese Dokumentation umfasst 39 Seiten.

- 🔥 Von der IHK Frankfurt am Main öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige für Brandschutz
- 🔥 Prüfsachverständige für Brandschutz nach HPPVO
- 🔥 Nachweisberechtigte für vorbeugenden Brandschutz
- 🔥 Brandschutzkonzepte für alle Regel- und Sonderbauten im In- und Ausland
- 🔥 Ingenieurmethoden des Brandschutzes
- 🔥 Planung von Feuerlöschanlagen
- 🔥 Brandschutzbeauftragter/Schulungen
- 🔥 Feuerwehrpläne/Flucht- und Rettungspläne

### Gesellschafter/Geschäftsführer

**Dipl.-Ing. Tobias Endreß**  
Bauingenieur  
Industrie-Informatiker  
Brandschutzsachverständiger

### Geschäftsführer

**Dipl.-Ing. Jürgen Endreß**  
Branddirektor a. D.  
ö.b.u.v. Sachverständiger  
für Brandschutz

**Dipl.-Ing. (FH) Carsten Steiner**  
Bauingenieur  
Brandschutzsachverständiger

**Detlev Struckmeier**  
Kaufmann



Zentrale  
Berner Straße 38  
60437 Frankfurt am Main



069 - 9509594 - 0



069 - 9509594 - 45



[www.brandschutz-gutachter.de](http://www.brandschutz-gutachter.de)



[info@brandschutz-gutachter.de](mailto:info@brandschutz-gutachter.de)



Taunus Sparkasse  
IBAN DE91 5125 0000 0001 0415 41

Commerzbank  
IBAN DE23 5004 0000 0480 0280 00

Amtsgericht: Frankfurt am Main  
HRB 85735  
Steuernr.: 045 232 41258  
UID-Nr.: DE 265 591 693  
D-U-N-S: 341390634

Qualifikationen / Mitgliedschaften





### Index

Nr.	Datum	Abschnitt	Vorgang, Änderung	Bearbeiter
-	21.06.2019	Gesamt	Erstmaliges Erstellen der Dokumentation	A. Kawohl



Inhaltsverzeichnis	Seite
<b>1 Allgemeines.....</b>	<b>5</b>
1.1 Auftrag und Bestimmung der Feuer- und Rauchgassimulation .....	5
1.2 Parameter .....	5
1.3 Bedingungen der Simulation.....	5
1.4 Verwendete Unterlagen .....	6
<b>2 Ziel .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Methode .....</b>	<b>9</b>
3.1 Allgemeines und Dokumentation .....	9
3.2 Feldmodell .....	9
3.3 Energiedissipation (Large Eddy Simulation) .....	10
3.4 Verbrennungsmodell.....	11
3.5 Strahlungstransport .....	11
3.6 Wärmeübergang .....	11
3.7 Abgrenzung zu verwandten Methoden .....	12
3.8 Validierung.....	12
<b>4 Geometrische Modelle .....</b>	<b>13</b>
4.1 Modell des Tunnels Forst .....	13
4.2 Modell des Tunnels Hirsau .....	15
4.3 Modell der S-Bahn-Zugseinheit .....	17
<b>5 Beschreibung der durchgeführten Simulationen .....</b>	<b>18</b>
5.1 Zugbrand in Tunnelmitte .....	18
5.2 Randbedingungen der Simulationen.....	18
<b>6 Bemessungsbrand .....</b>	<b>21</b>
6.1 Parameter der Verbrennung .....	22
6.2 Brandort.....	23
6.3 Anfangstemperatur und -luftfeuchtigkeit .....	24
6.4 Aufgeprägte Strömungen.....	25



<b>7</b>	<b>Analyse .....</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Bewertung .....</b>	<b>28</b>
8.1	Tunnel Forst.....	28
8.1.1	Ergebnisse aus Simulation 1 –Tunnel Forst ohne Wind .....	28
8.1.2	Ergebnisse aus Simulation 2 – Tunnel Forst mit Wind .....	30
8.1.3	Vergleich der Simulationen 1 und 2 – Tunnel Forst.....	32
8.2	Tunnel Hirsau .....	33
8.2.1	Ergebnisse aus Simulation 3 – Tunnel Hirsau ohne Wind .....	33
8.2.2	Ergebnisse aus Simulation 4 – Tunnel Hirsau mit Wind .....	35
8.2.3	Vergleich der Simulationen 3 und 4 – Tunnel Hirsau.....	37
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>38</b>
<b>10</b>	<b>Ausfertigung .....</b>	<b>39</b>



## **1 Allgemeines**

### **1.1 Auftrag und Bestimmung der Feuer- und Rauchgassimulation**

Der Endreß Ingenieurgesellschaft mbH Brandschutzsachverständige wurde der Auftrag zur Durchführung einer Feuer- und Rauchgassimulation für o.g. Objekt erteilt, um die Temperaturen an der geplanten Abtrennung für die Fledermaus-Ersatzquartiere in den Tunneln Forst und Hirsau im Brandfall zu ermitteln.

### **1.2 Parameter**

Neben der anzusetzenden Brandlast sind die geometrischen Verhältnisse der baulichen Anlage sowie bauphysikalische Randbedingungen die wesentlichen Parameter für die Feuer- und Rauchgassimulation.

Zu den bauphysikalischen Randbedingungen gehören die relative Luftfeuchtigkeit, die „Innenraumtemperatur“ sowie eventuell vorherrschende Windverhältnisse.

### **1.3 Bedingungen der Simulation**

Mit dem Auftraggeber wurde vereinbart für die Feuer- und Rauchgassimulation den S-Bahn-Bemessungsbrand (Zugeinheit ET 423) aus dem Anwenderhandbuch „Bemessungsbrände für S-Bahnen und Gemischten Reisezugverkehr“ anzusetzen. Dabei handelt es sich um ein mit dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) abgestimmtes sowie als Planungsgrundlage für unterirdische Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn festgelegtes Dokument.

Für die Feuer- und Rauchgassimulation wurde angenommen, dass der Zug jeweils in Tunnelmitte zum Stehen kommt. Es wurde pro Tunnel jeweils eine Simulation ohne Windbeanspruchung und eine Simulation mit zusätzlicher Längsströmung in Tunnelrichtung aus Windbeanspruchung durchgeführt.



### 1.4 Verwendete Unterlagen

Inhalt, Darstellung	Stand	Maßstab	Ersteller
Lageplan: km 35,1+10 bis km 36,4+42	10.07.2017	1:1000	Mailänder Consult GmbH
Lageplan: km 36,2+52 bis km 37,3+80	03.04.2017	1:1000	Mailänder Consult GmbH
Lageplan: km 43,1+50 bis km 44,1+00	10.07.2017	1:1000	Mailänder Consult GmbH
Lageplan: km 44,1+00 bis km 44,8+60	28.08.2017	1:1000	Mailänder Consult GmbH
Tunnel Forst – alle Schnitte (P5710_Anl._3.1)	24.07.2018	1:1000	unbekannt
Tunnel Hirsau – alle Schnitte (P5710_Anl._3.1)	27.07.2018	1:1000	unbekannt
Kammerlösung Tunnel Hirsau - Regelquerschnitt km 43,7+74,64	20.06.2018	1:50	Mailänder Consult GmbH
Tunnel Hirsau – Querschnitt km 36,9+00	24.04.2018	1:10 / 1:25	DR. SPANG <sup>1</sup>

Tabelle 1: Verwendete Planunterlagen

Inhalt, Bezeichnung	Autor, Hrsg.	Fassung, Stand
Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr - Anwenderhandbuch	A. Haack, J. Schreyer	21.06.2010
Revitalisierung der Bahnverbindung Weil der Stadt – Calw (Hermann-Hesse-Bahn): Bauklimatische Anforderungen an die Fledermaus-Ersatzquartiere und bauliche Umsetzung – Teil 1: Ergebnisse der Voruntersuchungen	Kurz und Fischer GmbH, Beratende Ingenieure, E. Fischer	31.05.2017

Tabelle 2: Sonstige verwendete Unterlagen

<sup>1</sup> DR. SPANG Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH

Auf der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw sind zwei Tunnel – Tunnel Forst und Tunnel Hirsau – vorhanden. Die Tunnel werden derzeit von Fledermäusen als Wohnstatt verwendet. Nach Inbetriebnahme der Bahnstrecke sollen die Tunnel den Fledermäusen weiterhin zur Verfügung stehen. Hierzu wird ein Bereich des Tunnels mit der sogenannten „Kammerlösung“ abgetrennt. Mittels Stahlprofilen und Schallschutzpaneelen (Deckschichten aus Aluminium, Mineralwollgedämmung) wird ein Teil des Tunnels von der Bahnstrecke abgeschottet und steht somit weiterhin den Fledermäusen zur Verfügung, siehe Abbildung 1.

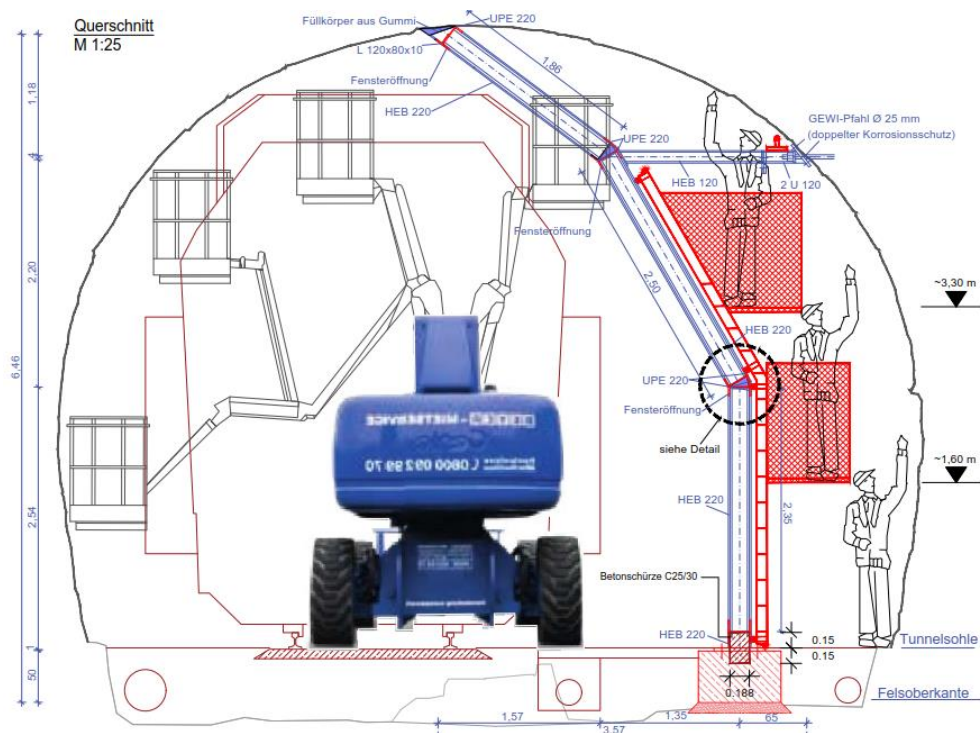


Abbildung 1: Darstellung Tunnelquerschnitt „Kammerlösung“, Quelle: DR. SPANG Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH



Bei einem Brandereignis in einem Zug lautet im Regelfall die Anweisung an die Zugführer nicht innerhalb eines Tunnels und wenn möglich auch nicht auf offener Strecke, sondern im Idealfall an einer Haltestelle zu halten. Dies erleichtert sowohl die Evakuierung des Zuges als auch die Löscharbeiten.

Für den unwahrscheinlichen Fall, dass ein Zug im brennenden Zustand im Tunnel halten muss, möchte der Auftraggeber einen Nachweis, dass die sich im Zug befindenden Personen fliehen könnten, ohne von herabfallenden Teilen der „Kammer“ gefährdet zu werden.

Ziel der Feuer- und Rauchgassimulation ist die Ermittlung des Temperaturverlaufs an den Schallschutzpaneelen im Brandfall. Es soll ermittelt werden in welchem Zeitraum die kritische Temperatur erreicht wird.





### 3 Methode

#### 3.1 Allgemeines und Dokumentation

Die Berechnungen der Strömungen sowie Temperaturen im Tunnel Forst und im Tunnel Hirsau wurden mit dem Programm „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) in der Version 6.5.3 durchgeführt, das am National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland, USA, entwickelt wurde.

Benutzt wurde eine 64-bit-Version mit einem Windows 10-64-Betriebssystem. Alle technischen Details und der vollständige Quellcode sind öffentlich zugänglich:

K. B. McGrattan et al. (Hrsg.): „Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide“, NIST Special Publication 1018-1-3, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, January 2017.

K. B. McGrattan et al. (Hrsg.): „Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide“, NIST Special Publication 1019, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, January 2017.

G. P. Forney: „Users Guide for Smokeview Version 6 – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data“, NIST Special Publication 1017-1, Sixth Edition, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, January 2017.

Es handelt sich um ein Computermodell zur Berechnung der Strömungsdynamik durch Feuer induzierte Vorgänge.

#### 3.2 Feldmodell

Dabei werden die Navier-Stokes-Gleichungen der Strömungsmechanik unter den Randbedingungen einer Geometrie gelöst, welche von den Anwendern frei vorgegeben werden kann. Es ist ein Feldmodell, das die räumlichen Variationen der Verbrennungsprozesse und des Wärme- und Materialtransportes in drei Dimensionen, dem natürlichen Raum, berechnet. Die nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen werden dabei auf einem Gitter gelöst.



Der Auflösung des Gitters entsprechen die kleinsten geometrischen Einheiten, für die noch Werte physikalischer Größen von benachbarten Einheiten unterschieden werden können. Die Auflösung kommt jedoch selbst kein physikalischer Charakter zu: Es ist eine reine Hilfsgröße für die Rechnung, die sich häufig dadurch ergibt, dass eine Rechnung mit feinerer Auflösung nicht mehr durchführbar ist. Eine Verfeinerung der Auflösung führt zu einer überproportional höheren Rechenzeit. Für eine ausgedehnte und komplexe Anlage führt die Rechenzeit schnell an die Grenzen der heute auch an Großrechnern verfügbaren Technik.

### 3.3 **Energiedissipation (Large Eddy Simulation)**

Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben die Dissipation von Energie. Diese führt von großen räumlichen Strukturen, etwa großräumige Ausbreitungen, über mittlere, etwa Wirbelbildungen, bis hin zu den kleinsten Strukturen. Entscheidend für die Dissipation, für die nichtidealen Eigenschaften der Strömungsdynamik, sind allein die kleinsten Strukturen.

Eine direkte numerische Berechnung der nichtlinearen Navier-Stokes-Gleichungen mit einer zwangsläufig endlich großen Auflösung, die um Größenordnungen über diesen kleinsten Strukturen liegt, kann damit die komplette Physik nicht beschreiben. Insbesondere die Energieerhaltung wird unvollständig wiedergegeben.

Dieser Schwachpunkt kann überwunden werden: Eine Methode hierzu wird „Large Eddy Simulation“ genannt. Durch sie werden die Dissipationskanäle, welche numerisch abgeschnitten werden, physikalisch wieder gekoppelt. Dieses rechenintensive Verfahren ist heute der technische Standard der Strömungssimulationen<sup>2</sup>. Bei Anwendungen zur Simulation von Bränden ist dies allerdings noch die Ausnahme. FDS ist eines der ersten Programme, das diese Methode anwendet.

<sup>2</sup> In dem Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten, welche auch bei Bränden typischerweise auftreten. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten ist bislang keine numerisch stabile Korrektur möglich.



### 3.4 Verbrennungsmodell

Dem Modell liegt eine fortgeschrittene Methode, die Verbrennung selbst zu modellieren, zugrunde. Mit dieser Methode wird der Sauerstoffverbrauch durch das Feuer realistisch wiedergegeben. Bei dieser Methode, die als „Mixture Fraction“ bezeichnet wird, wird die Verbrennung als Mischungskontrolliert angenommen, das heißt, die Reaktion von Sauerstoff und Brennstoffen wird als sehr schnell im Vergleich zu anderen Prozessen angesetzt. Die Massenanteile der wichtigsten Reaktionspartner und Reaktionsprodukte können im Rahmen dieses Modells über analytisch und empirisch bestimmte Zustandsgleichungen angegeben werden.

### 3.5 Strahlungstransport

Hitzestrahlung ist ein elementares Brandgeschehen: Rund 30 – 40 % der Brandleistung wird als Strahlung, unabhängig von der Gasströmung, im Raum verteilt. Dieser fundamentale Strahlungstransport wird über ein Modell eines grauen Strahlers beschrieben. Die Gleichungen hierfür werden analog zur Methode der Finiten Volumen, wie sie für den Transport durch Konvektion gebräuchlich sind, gelöst. Hierzu werden ca. 100 diskrete Winkelpositionen durchgerechnet, wodurch dieses Strahlungstransportmodell zu ca. 15 % der vom Computer benötigten Zeit beträgt.

### 3.6 Wärmeübergang

Der Wärmeübergang zwischen den Rauchgasen und den Bauteilen sowie auch bei den Bauteilen untereinander spielt für die Abkühlung und damit für die Ausbreitung der Rauchgase eine wichtige Rolle. FDS lässt eine individuelle Modellierung des thermischen Verhaltens jedes Bauteils zu. Um den Wärmeübergang zu bestimmen, ermittelt das Programm nicht nur das thermische Verhalten der Grenzschicht, sondern löst auch für jeden Zeitschritt die Gleichungen für die Wärmeleitung der Bauteile.



### 3.7 Abgrenzung zu verwandten Methoden

Verfügbare Feldmodelle zur Simulation der Rauchausbreitung (Brandsimulation) unterscheiden sich in zweierlei Hinsicht: in der Frage, ob und wie die Energiedissipation korrigiert wird und in dem Umfang, in dem die fundamentalen Brandprozesse im Modell integriert sind. FDS verwendet hier die am weitesten entwickelte Modellierung. Dafür ist aber gegenüber anderen Modellen mit einem deutlich erhöhten Rechenaufwand zu rechnen. Es gibt Brandsituationen, in dem dieser Gewinn an Modellgenauigkeit nicht erforderlich ist. Jedoch bedarf es viel Erfahrung, diese Situationen von den anderen zu unterscheiden. Häufig lässt sich dies vor Ende einer langen numerischen Berechnung nicht zuverlässig einschätzen. Daher ist FDS international zu dem am meisten verwendeten Brandsimulationsmodell geworden und es erwächst daraus quasi einer neuer Standard.

### 3.8 Validierung

Der Nachweis, dass eine ingenieurstechnische Methode die Realität in einem zum Abgleich mit Schutzzielen angemessenen Umfang beschreibt, fehlt bei vielen Computernmodellen, da er aufwendig zu führen ist. Die Vorstellungen darüber, wie eine Validierung durchzuführen ist, gehen weit auseinander. Sie müssen jedoch grundsätzlich nachvollziehbar sein. Das heißt auch, dass sie veröffentlicht sein müssen. In den vergangenen Jahren ist die Normung<sup>3</sup>, wie validiert werden soll, weit vorangeschritten. FDS ist zurzeit das einzige Feldmodell, das systematisch im Rahmen einer Norm, ASTM E1355<sup>4</sup>, validiert wurde. Die Ergebnisse sind in Technical User Guide Volume 2 und Volume 3 veröffentlicht.

<sup>3</sup> Etwa ISO 16730-1:2015 „Fire safety engineering – Procedures and requirements for verification and validation of calculation methods“, International Organization for Standardization, Genf

<sup>4</sup> „Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models“, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA



## 4 Geometrische Modelle

Als Basis für die Simulation der Rauchausbreitung wurden zwei dreidimensionale, digitale Modelle mit der Software „blender“ erstellt. Diese digitalen Modelle wurden auf Grundlage von zweidimensionalen, elektronischen Plänen aufgebaut. Für beide Tunnel wurde jeweils ein eigenes Modell erstellt. Für die Modellierung wurden die vom Entwurfsverfasser bereitgestellten Pläne zugrunde gelegt.

Um die Rechenzeit zu minimieren, wurde jeweils nur ein möglichst kleiner Abschnitt der Umfassungswände des Tunnels modelliert. Die Außenansicht stellt sich daher als eine Folge von zusammengesetzten Quadern dar. Der Tunnel selbst entspricht jedoch jeweils der korrekten Streckenführung sowohl in Längsrichtung, als auch der Neigung in Längs- und in Querrichtung.

### 4.1 Modell des Tunnels Forst

Die geometrische Auflösung des Modells bestimmt die Zahl der Gitterpunkte, an denen alle Größen der Simulation berechnet werden. Die Rechenzeit für eine Simulation hängt quadratisch von der Anzahl dieser Gitterpunkte ab. Um sinnvolle Aussagen und zeitgleich handhabbare Rechenzeiten zu erzielen, muss die Anzahl der Gitterpunkte diesbezüglich optimiert werden. Als Auflösung wurde eine Gittergröße mit einer Kantenlänge von jeweils 0,2 m gewählt. Für die hier durchgeführten Simulationen ist diese Auflösung ausreichend genau.

Zur Erstellung des geometrischen Modells wurden der Lageplan sowie die Querschnitte für den Tunnel Forst (siehe auch Abschnitt 1.4) als Grundlage verwendet. Eine Ansicht des geometrischen Modells ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Schrägansicht des digitalen Modells des Tunnels Forst

Die Mitte des Tunnels befindet sich bei Streckenkilometer 36,719 (36,7 + 19). Der Zug wurde im Modell so platziert, dass dies auch die Mitte des Zugs (zwischen Wagen 2 und Wagen 3) darstellt, siehe Abbildung 3 und Abbildung 4.

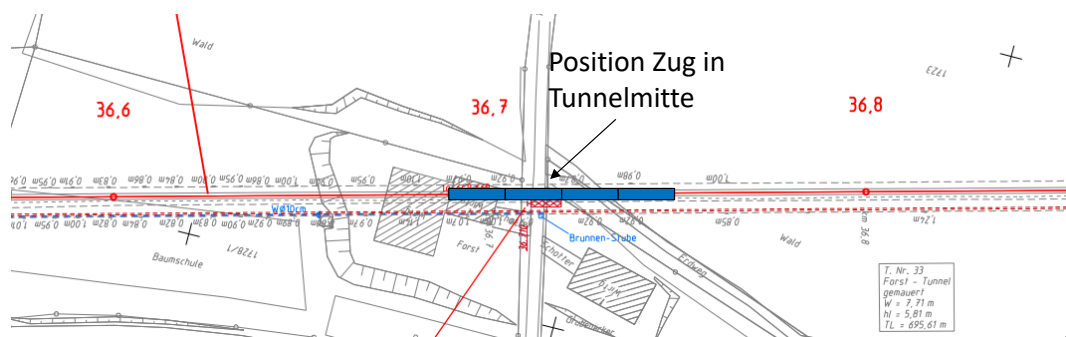


Abbildung 3: Positionierung des Zugs in Mitte des Tunnels Forst (Ausschnitt aus Lageplan 09)

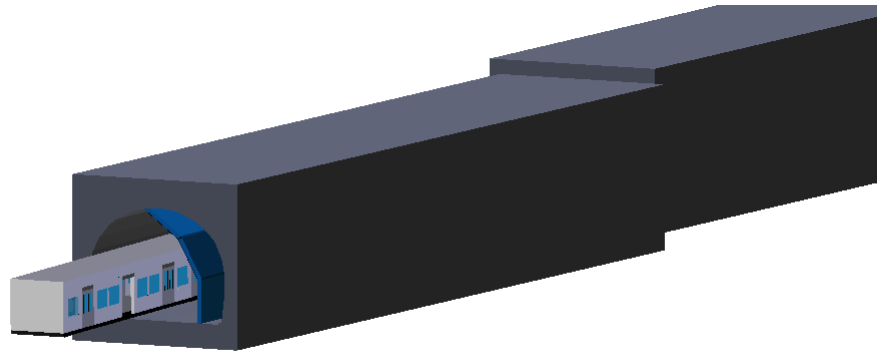


Abbildung 4: Schnitt durch digitales Modell des Tunnels mit Darstellung des Zugmodells

## 4.2 Modell des Tunnels Hirsau

Für das Modell des Tunnel Hirsau wurde ebenfalls eine Gittergröße mit einer Kantenlänge von jeweils 0,2 m gewählt. Zur Erstellung des geometrischen Modells wurden die Lagepläne sowie die Querschnitte für den Tunnel Hirsau (siehe auch Abschnitt 1.4) als Grundlage verwendet. Eine Ansicht des geometrischen Modells ist in Abbildung 5 dargestellt.

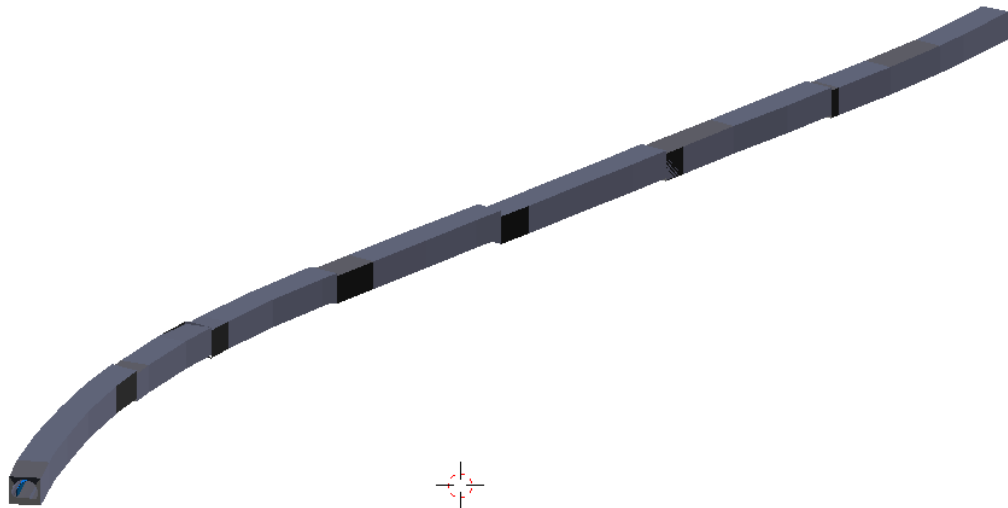


Abbildung 5: Schrägansicht des digitalen Modells des Tunnels Hirsau

Die Mitte des Tunnels befindet sich bei Streckenkilometer 44,036 (44,0 + 36). Der Zug wurde im Modell so platziert, dass dies auch die Mitte des Zugs (zwischen Wagen 2 und Wagen 3) darstellt, siehe Abbildung 6 und Abbildung 7.

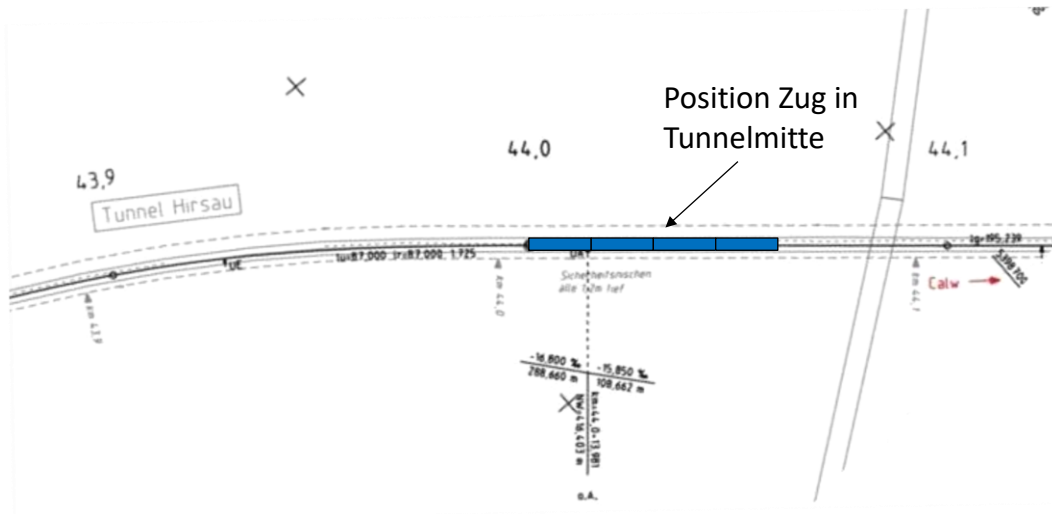


Abbildung 6: Positionierung des Zugs in Mitte des Tunnels Hirsau (Ausschnitt aus Lageplan 16)

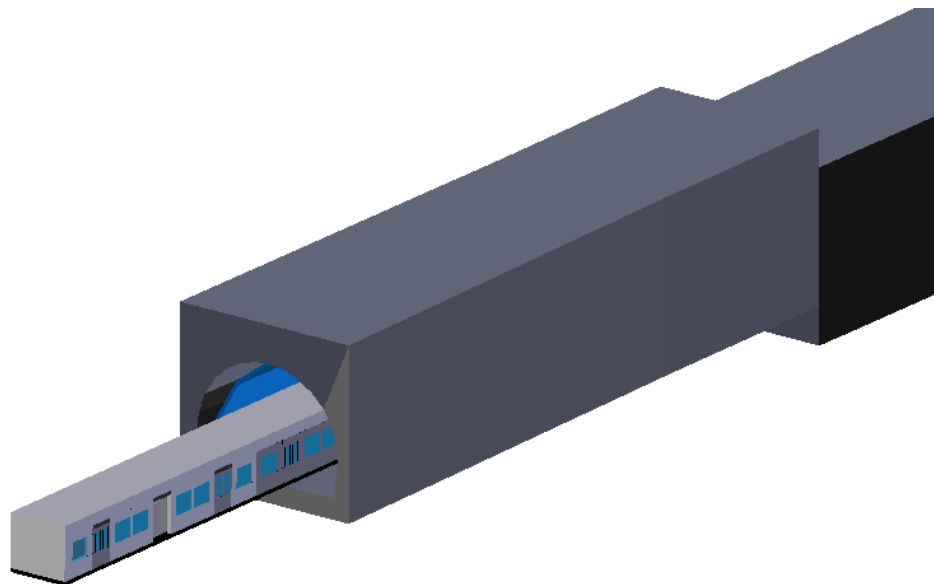


Abbildung 7: Schnitt durch digitales Modell des Tunnels mit Darstellung des Zugmodells



### 4.3 Modell der S-Bahn-Zugeinheit

Das geometrische Modell der Zugeinheit wurde entsprechend der Vorgaben aus dem Dokument „Bemessungsbrände für S-Bahnen und Gemischten Reisezugverkehr – Anwenderhandbuch“ erstellt.

Das Modell besteht aus vier Wagen mit Innenabmessungen von jeweils 15 m x 2,80 m, also 60 m x 2,80 m für die gesamte Zugeinheit. Die Umfassungsbauteile wurden mit einer Dicke von 0,2 m erzeugt, was der Gitterweite des Gesamtmodells entspricht. Dem Modell liegt die Annahme zu Grunde, dass auf einer Seite jeweils die mittlere Tür pro Wagen geöffnet ist und alle übrigen Türen geschlossen. Die Fenster werden im Laufe des Brandereignisses sukzessive zerstört (aus dem Modell entfernt).

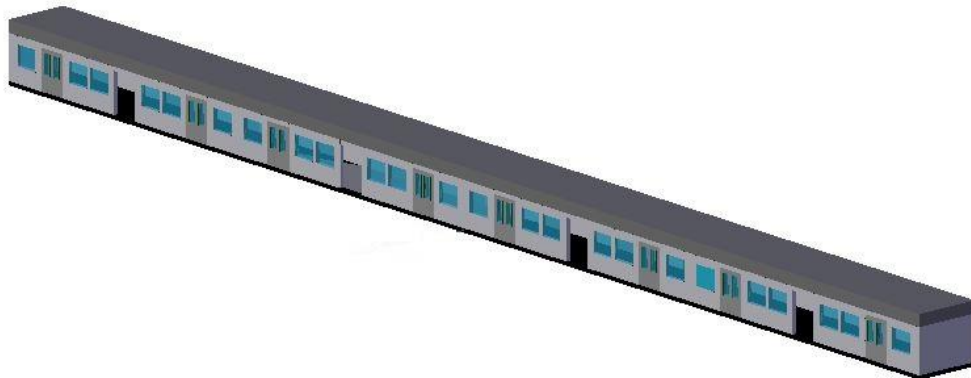


Abbildung 8: *Digitales Modell der S-Bahn-Zugeinheit für den S-Bahn-Bemessungsbrand*

Das Versagen der Fensterscheiben sowie die Materialeigenschaften der Zugbauteile wurden entsprechend der Vorgaben implementiert.



## 5 Beschreibung der durchgeführten Simulationen

### 5.1 Zugbrand in Tunnelmitte

Die Brandsimulationen 1 und 2 umfassen einen S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Forst. Das Modell der S-Bahn wird, wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, positioniert. In der Brandsimulation 1 wird keine zusätzlich Längsströmung aus Windbeanspruchung aufgebracht. In Brandsimulation 2 wird auf Basis der Voruntersuchungen von Kurz und Fischer GmbH eine zusätzliche Strömung in Tunnellängsrichtung aus Wind aufgebracht.

Die Brandsimulationen 3 und 4 umfassen einen S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Hirsau. Das Modell der S-Bahn wird, wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, positioniert. In der Brandsimulation 3 wird keine zusätzlich Längsströmung aus Windbeanspruchung aufgebracht. In Brandsimulation 4 wird auf Basis der Voruntersuchungen von Kurz und Fischer GmbH eine zusätzliche Strömung in Tunnellängsrichtung aus Wind aufgebracht.

### 5.2 Randbedingungen der Simulationen

Allgemeine Angaben	
Beschreibung des Schutzziels:	Personenrettung
Angaben zum CFD-Modell	
Bezeichnung des Modells:	Fire Dynamics Simulator – FDS
Modelltyp:	6.5.3 für Windows 64 bit
Softwarehersteller:	NIST
Beschreibung der Objektmodellierung	
Netzgenerierung:	von Hand
Art des verwendeten Netzes:	Strukturierte Rechennetze aus Hexaedern; Kantenlänge: 20 cm
Anzahl der Netzelemente:	Simulation Tunnel Forst: 7.931.250 Simulation Tunnel Hirsau: 10.058.000



<b>Anfangsbedingung aller im Modell definierten Volumen</b>	
Lösungsalgorithmus:	Poisson
Umgebungstemperatur:	24 °C außerhalb des Tunnels 20 °C am Tunnelportal 10 °C in Tunnelmitte
Anfangsströmung in x-y-z Richtung:	Simulation 1 und 3: 0-0-0 m/s Simulation 2 und 4: 1,6-0-0 m/s
<b>Randbedingungen aller im Modell definierten Oberflächen</b>	
Tunnelwand	Beton mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 0,88 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,1 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 2.100 \text{ kg/m}^3$
Schallschutzpaneele	Aluminiumdeckblech mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 0,9 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 220 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$ Bauteilrückseite isoliert
Wagenaußenhaut Zug	Aluminium mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 0,9 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 220 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 2.700 \text{ kg/m}^3$ Bauteilrückseite isoliert
Innenwandbekleidung Zug	GF-UP mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 1,92 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,5 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 1.800 \text{ kg/m}^3$ Bauteilrückseite isoliert
Deckenbekleidung Zug	PUR mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 2,13 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,5 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 950 \text{ kg/m}^3$ Bauteilrückseite isoliert
Fenster	Glas mit: spezifische Wärmekapazität $C_p = 0,84 \text{ kJ/kgK}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,22 \text{ W/mK}$ Rohdichte $\rho = 1.200 \text{ kg/m}^3$
Brandherd:	Entsprechend S-Bahn-Bemessungsbrand aus „Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr - Anwenderhandbuch“
<b>Simulationsdauer:</b>	1.800 Sekunden (30 Minuten)
<b>Anzahl der Einzelbilder:</b>	1800 (ein Einzelbild jede Sekunde)
<b>Konvergenzkriterium:</b>	Courant Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL)



<b>Definition der Fluideigenschaften:</b>	
Dichte:	voreingestellter Parameter in FDS
Viskosität:	voreingestellter Parameter in FDS
Wärmeleitfähigkeit:	voreingestellter Parameter in FDS
Wärmekapazität:	voreingestellter Parameter in FDS
<b>Physikalische / chemische Modelle</b>	
Turbulenzmodell:	Large Eddy Simulation (LES)
Verbrennungsmodell:	Mischungskontrollierte Verbrennung
Strahlungsmodell:	Lösung der Strahlungstransportgleichung für graues Gas mittels Finiter Volumen Methode
<b>Brandverlaufskurve</b>	Entsprechend S-Bahn-Bemessungsbrand aus „Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr - Anwenderhandbuch“
<b>Kennwerte des Bemessungsbrandes / der Bemessungsbrände</b>	
Anteil der Strahlungsleistung:	40 %
Max. Wärmefreisetzungsrate:	S-Bahn-Brand: 55 MW
Darstellung der Brandverlaufskurve:	siehe Abschnitt 6

### 6 Bemessungsbrand

Für die Feuer- und Rauchgassimulationen in den Tunneln Forst und Hirsau wurde mit dem Auftraggeber vereinbart den S-Bahn-Bemessungsbrand (Zugeinheit ET 423) aus dem Anwenderhandbuch „Bemessungsbrände für S-Bahnen und Gemischten Reisezugverkehr“ anzusetzen.

Dieser Bemessungsbrand berücksichtigt kritische Lüftungsverhältnisse und zusätzliche Brandlasten durch zurückgelassenes Gepäck von Reisenden.

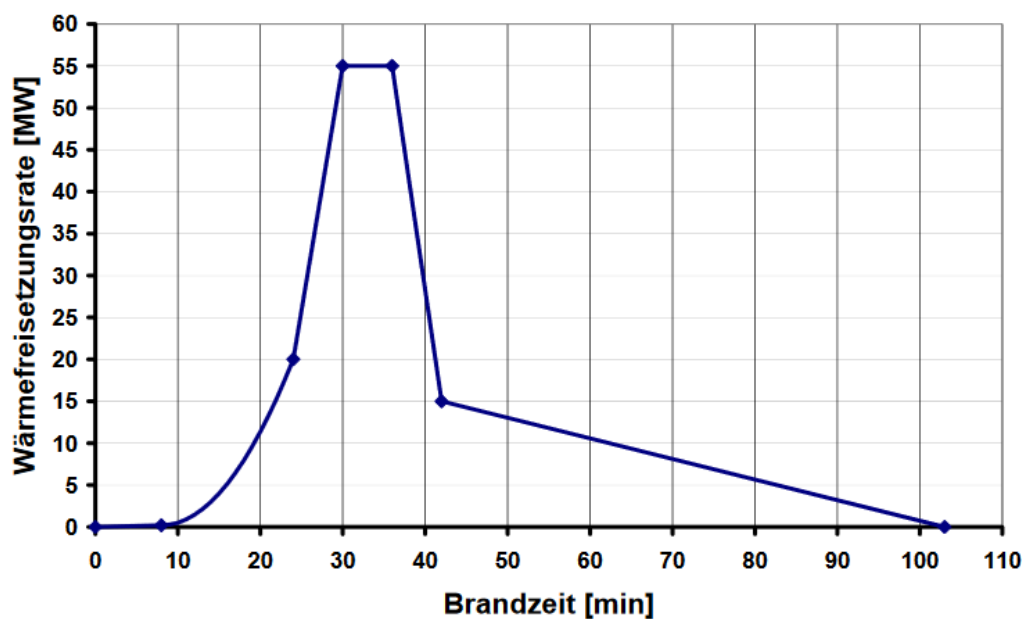


Abbildung 9: S-Bahn-Bemessungsbrandkurve (55 MW)<sup>5</sup>

Die in Abbildung 9 dargestellte Bemessungsbrandkurve gilt laut Anwenderhandbuch für oberirdisch und unterirdisch verkehrende S-Bahn-Fahrzeuge mit Ausstattung und Konstruktion nach DIN 5510 bzw. als vergleichbar eingestufte Fahrzeuge (ET-Baureihe 420, 423, 472, 474 und 481) bei einer maximalen Länge der Zugeinheit von ca. 70 m.

<sup>5</sup> vgl. A. Haack, J. Schreyer, S. 5



Der Bemessungsbrand berücksichtigt weiterhin die Annahme, dass der Brand im ersten Wagen der Zugeinheit entsteht und sich von dort in Fahrzeuglängsrichtung auf den zweiten Wagen ausbreitet. Im Modell für die Simulation mit FDS wird hierzu die gesamte Fußbodenfläche des Fahrgastraums des betreffenden Wagens (15,0 m lang und 2,8 m breit) als Brandquelle mit vorgegebener Wärmefreisetzungsrate angenommen, siehe Tabelle 3.

Zeit in min	Wärmefreisetzungsrate in kW				Summe
	Wagen 1	Wagen 2	Wagen 3	Wagen 4	
0	0	0	0	0	0
8	200	0	0	0	200
24	20.000	0	0	0	20.000
25	22.080	3.750	0	0	25.830
30	32.500	22.500	0	0	55.000

Tabelle 3: Wagenspezifische Wärmefreisetzung im Modell der Zugeinheit bis zur 30. Minute nach Brandbeginn<sup>6</sup>

### 6.1 Parameter der Verbrennung

In welcher Weise die Wärmefreisetzung mit der Freisetzung von Rauch oder genauer der wichtigsten Bestandteile der Brandgase verbunden ist, lässt sich bei numerischen Brandsimulationen über verschiedene Parameter steuern. Die Programme unterscheiden sich jedoch in der Art der Parameter. FDS verfügt mit dem Mixture-Fraction-Modell der Verbrennung über ein weit entwickeltes Modell, das mit einem Minimum an freien Parametern auskommt.

Die Freisetzung der Rauchgase ist für die Bestimmung der Temperatur von grundlegender Wichtigkeit. Die Wärmefreisetzung und somit auch die Wärmeweitergabe setzen sich aus einem Strahlungs- und einem Konvek-

<sup>6</sup> vgl. A. Haack, J. Schreyer, S. 13



tionsanteil zusammen. Die Temperaturentwicklung im Raum ist somit abhängig von der thermischen Strömung, sprich der Rauchausbreitung.

Für den S-Bahn-Bemessungsbrand werden die brennstoffspezifischen Verbrennungsparameter bei Verwendung von FDS vorgegeben:

Reaktionsparameter	Bezeichnung / Wert
Brennstoff	Polyurethan
Summenformel	$\text{CH}_{1.13}\text{O}_{0.34}\text{N}_{0.16}$
molare Masse	20,81 kg/kmol
CO-Entstehungsanteil	0,2 kg/kg
Rauchpartikel-Entstehungsanteil	01, kg/kg
effektive Verbrennungswärme	15 MJ/kg
Strahlungsanteil an der Gesamtwärmefreisetzung	0,4

Tabelle 4: Verbrennungsparameter der Brandquelle bei Verwendung von FDS für die Simulation des S-Bahn-Bemessungsbrandes<sup>7</sup>

## 6.2 Brandort

Wie bereits dargestellt ist das Ziel der hier beschriebenen Simulationen der Nachweis, dass die sich im Zug befindenden Personen fliehen könnten, ohne von herabfallenden Teilen der „Kammer“ gefährdet zu werden

Wie bereits eingangs beschrieben ist es höchst unwahrscheinlich, dass eine brennende Zugsinheit im Tunnel zum Stehen kommt. Die geltenden Anweisungen an Zugführer beinhalten, dass ein Schienenfahrzeug im Brandfall nicht in einem Tunnel und möglichst nicht auf freier Strecke sondern, sofern möglich an einer Haltestelle zum Stehen kommen soll.

Für den geforderten Nachweis wird jedoch die ungünstigste Lage des Brandortes angesetzt. Dies ist jeweils in Tunnelmitte, da hier die Tunnelausgänge am weitesten entfernt sind. Dies bedeutet, dass der durch

<sup>7</sup> vgl. A. Haack, J. Schreyer, S. 13



den Brand entstehende Rauch, aber auch die sich in dem Zug befindenden Personen den weitesten Weg zurücklegen müssen, um ins Freie zu gelangen.

### 6.3 Anfangstemperatur und -luftfeuchtigkeit

Für die klimatischen Randbedingungen wurde das Gutachten von Kurz und Fischer GmbH als Grundlage verwendet. Im Tunnel Forst wurde eine relativ konstante Temperatur von 10 °C gemessen. Die Messung fand an einem warmen Sommertag statt, so dass die Temperatur am Tunnelportal bei ca. 23 °C lag und mit zunehmender Strecke im Tunnel auf 10 °C absank. Aus den Wärmebildaufnahmen am Nordportal des Tunnels Hirsau lässt sich auf eine ähnliche Temperaturverteilung schließen. In den Modellen wurde daher in Windrichtung eine von 24 °C auf 10 °C abnehmende Anfangstemperatur implementiert.

Auch die gemessene relative Luftfeuchtigkeit änderte sich im Verlauf des Tunnels Forst. In weiten Teilen des Tunnels Forst wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 85 % gemessen. Für die Simulationen wurde in beiden Tunneln eine konstante relative Luftfeuchtigkeit von 60 % als Anfangswert implementiert. Dies ist ein konservativer Ansatz, da eine hohe relative Luftfeuchtigkeit die Temperaturentwicklung verlangsamt. Eine noch niedrigere relative Luftfeuchtigkeit anzusetzen würde die Simulation jedoch zu weit verfälschen. Eine niedrigere Luftfeuchte ist aufgrund der Innentemperatur von 10 °C fast ausschließlich im Winter bei Nordostwind möglich. Ein Abkühlen der Luft von außen im Tunnel führt zu einer Luftfeuchte von deutlich über 60 % im Innenraum, in genau der Weise, wie sie auch von Kurz und Fischer GmbH nachgewiesen wurde.





### 6.4 Aufgeprägte Strömungen

In dem Voruntersuchungsbericht von Kurz und Fischer GmbH wurde die klimatischen Bedingungen am Tag der Messungen als böig und windig im freien Gelände mit Wind aus westlicher und südlicher Richtung, später stagnierend beschrieben. Im Tunnel Forst wurde ein Luftstrom von West nach Ost mit Geschwindigkeiten zwischen 0,1 m/s und 0,4 m/s und Spitzen von 0,67 m/s gemessen.

Auf Grundlage der Beschreibungen des Berichtes, wird von einem Wind am Tag der Messung von etwa 2 Bft (Beaufort) ausgegangen. Für die Simulation wurde ein stärkerer Wind von 6 Bft angesetzt. Mittels der im Tunnel Forst gemessenen Geschwindigkeiten des Luftstroms und der Windgeschwindigkeiten für die beiden Windstärken wurde eine mittlere Geschwindigkeit des Luftstroms für die Simulationen von 1,6 m/s skaliert und in den Modellen implementiert.

Die Windrichtung von West nach Ost entspricht der Hauptwindrichtung für die Region der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw, so dass diese Strömungsrichtung auch für die Simulationen angenommen wurde.

### 7 Analyse

Im Rahmen der hier vorliegenden Simulationen liegt das Hauptaugenmerk auf der Temperaturentwicklung der Sandwichelemente zur Abtrennung der Ersatzquartiere für die Fledermäuse. Die geplante Konstruktion, bestehend aus Stahlprofilen mit einer Ausfachung mit Sandwichelementen aus Aluminiumdeckblech und Mineralwolledämmung, besteht aus nicht-brennbaren Baumaterialien. Sie bedingt jedoch aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Stahl- und Aluminium eine starke Erwärmung im Brandfall und somit einen Standsicherheitsverlust.

Als kritische Temperatur wurde von Seiten des Fachplaners DR. SPANG Ingenieurgesellschaft mbH  $T_{\text{crit}} = 350 \text{ °C}$  angegeben. Diese Temperatur wurde von Seiten des Fachplaners durch eine Heißbemessung ermittelt. Beim Überschreiten dieser Temperatur kann nicht mehr sichergestellt werden, dass die Sandwich-Paneele der Kammerabtrennung in ihrer Position verbleiben.

Die Simulationen werden daher hinsichtlich der Temperaturen an der Kammerwand (Sandwich-Paneele) ausgewertet. Die ausgewerteten Bereiche im Tunnel Forst und Tunnel Hirsau sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellt.

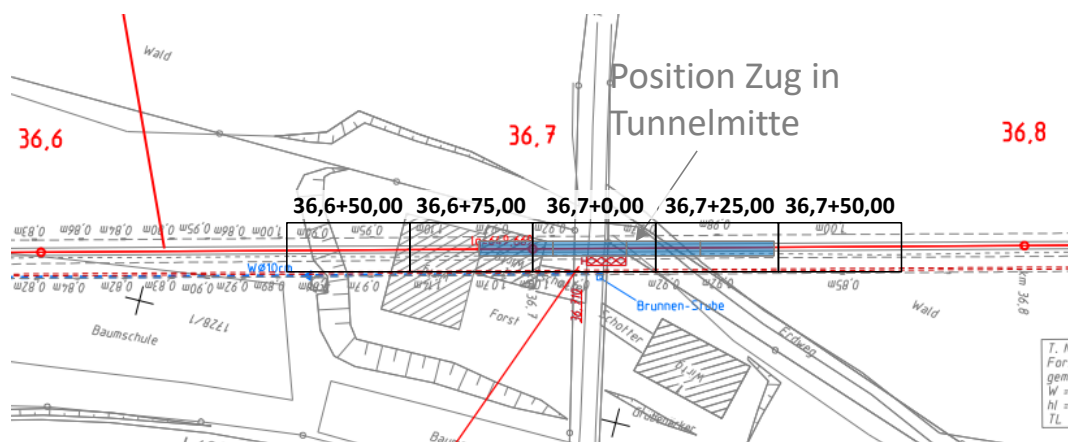


Abbildung 10: Darstellung der hinsichtlich der Temperaturen an der Kammerwand ausgewerteten Bereiche im Tunnel Forst

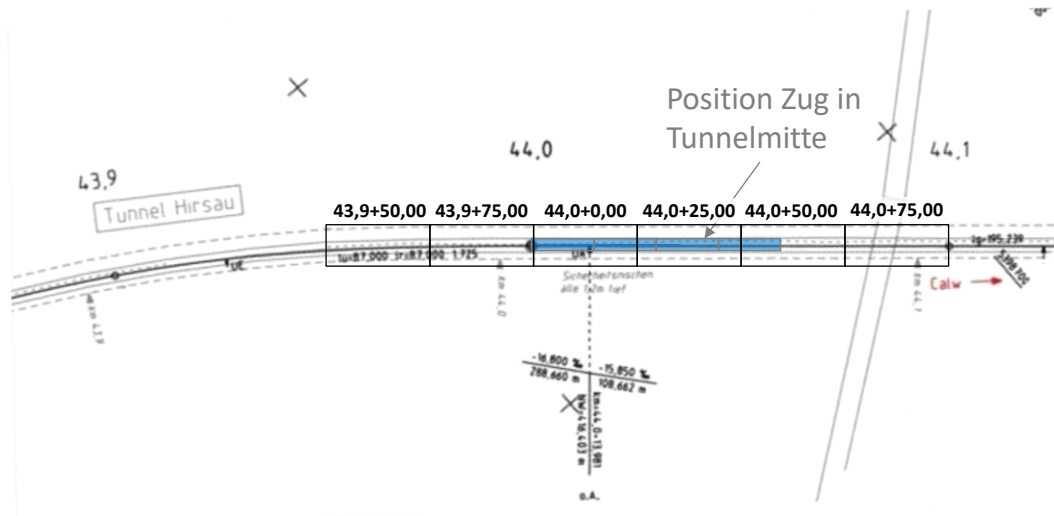


Abbildung 11: Darstellung der hinsichtlich der Temperaturen an der Kammerwand ausgewerteten Bereiche im Tunnel Hirsau

Die Stahlprofile der Konstruktion sollen mit einem Dämmschichtbildner gegen die Temperaturbeanspruchung geschützt werden und werden daher nicht näher betrachtet.

Im Rahmen des hier vorliegenden Berichtes wird nicht näher auf die Rauchausbreitung und die damit einhergehende Sichtbehinderung eingegangen. Für Tunnelbauwerke im Schienenverkehr wird in der Regel kein Nachweis der einer raucharmen Schicht gefordert, da wie bereits mehrfach erwähnt der Halt eines brennenden Schienenfahrzeugs innerhalb eines Tunnels aufgrund von Betriebsanweisungen nicht vorgesehen ist. Durch den Einbau der Abtrennung für die Ersatzquartiere der Fledermäuse wird die Rauchausbreitung innerhalb des Tunnels nicht grundlegend verändert.



## 8 Ergebnisse und Bewertung

Im Folgenden werden die Ausgabewerte der Temperaturen für die in Abschnitt 7 aufgeführten Bereiche dargestellt und hinsichtlich der Zeitspanne bis zum Erreichen der kritischen Temperatur für das eventuelle Versagen der Befestigungen der Sandwich-Paneele ausgewertet.

### 8.1 Tunnel Forst

#### 8.1.1 Ergebnisse aus Simulation 1 –Tunnel Forst ohne Wind

Die Simulation 1 umfasst den S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Forst. In dieser Simulation wurden keine zusätzlichen Längsströmungen aus Windbeanspruchungen in das Modell implementiert.

Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) ausgewertet. In Abbildung 12 sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt.

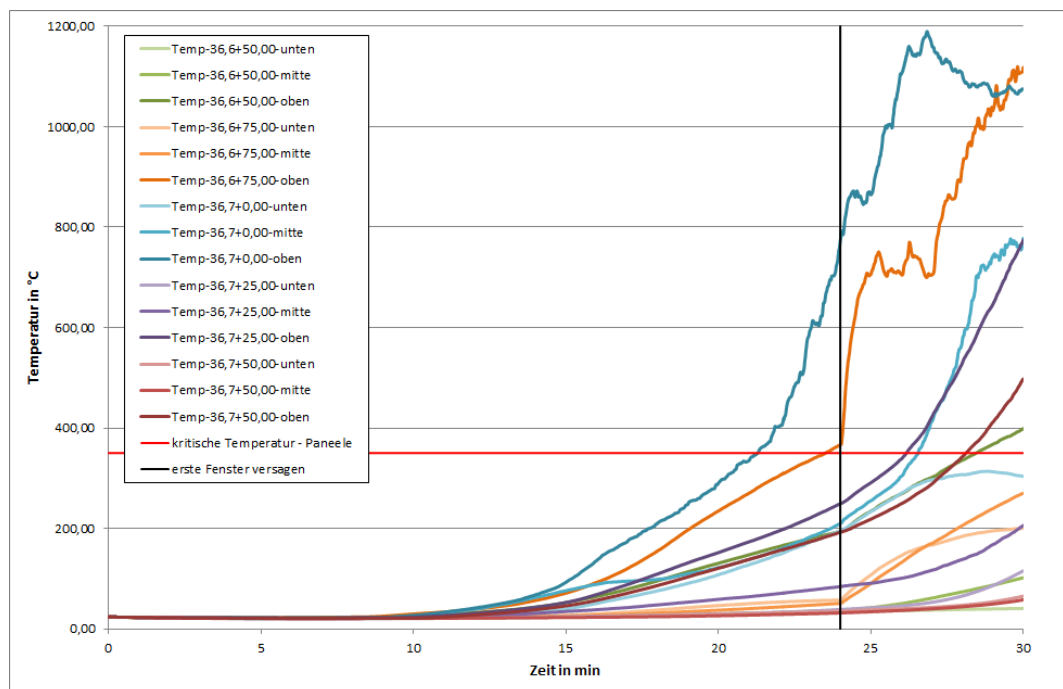


Abbildung 12: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Forst aus Simulation 1



Die Temperaturen der Wandpaneele steigen in den Bereichen 36,7+0,00 und 36,6+75,00 am stärksten an. Dies sind die Bereiche in unmittelbarer Nähe zum Brandereignis in Wagen 1, siehe auch Abbildung 10 auf Seite 26. Grundsätzlich steigen die Temperaturen der Wandpaneele im Deckenbereich schneller an. Durch die Thermik steigen die Rauchgase des Brandes nach oben und somit auch die heißen Brandgase. Die für die Wandpaneele kritische Temperatur von 350 °C wird zuerst im Bereich 36,7+0,00 nach einer Zeitdauer von ca. 21 min erreicht.

Der plötzliche Anstieg der Temperaturkurve für den Bereich 36,6+75,00 bei ca. 24 min lässt sich durch das Versagen der Fenster des Zugmodells erklären. Das Modell des Bemessungsbrandes enthält vorgegebene Zeiten, bei denen die Fenster des Zugmodells zerspringen. Durch die größeren Öffnungsflächen kann mehr Rauch aus dem Zug dringen.

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.

### 8.1.2 Ergebnisse aus Simulation 2 – Tunnel Forst mit Wind

Die Simulation 2 umfasst den S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Forst. In dieser Simulation wurden zusätzliche Längsströmungen aus Windbeanspruchungen in das Modell implementiert.

Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) ausgewertet. In Abbildung 13 sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt.

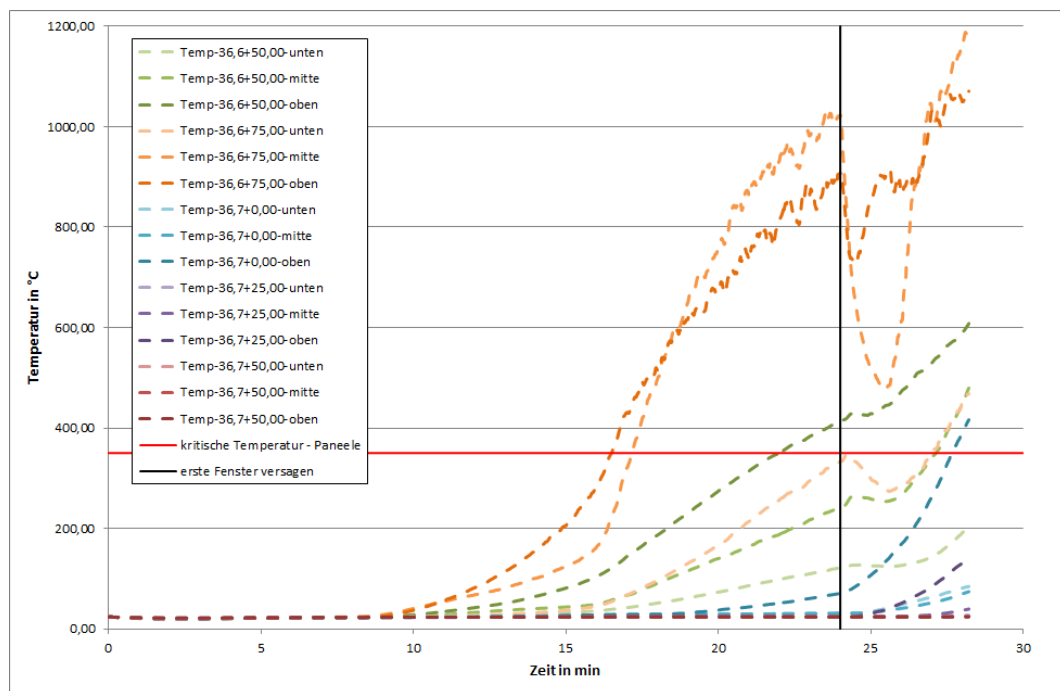


Abbildung 13: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Forst aus Simulation 2

Die Temperaturen der Wandpaneele steigen im Bereich 36,6+75,00 am stärksten an. Dies ist der Bereich in unmittelbarer Nähe zum Brandereignis in Wagen 1 allerdings etwas mehr Richtung Osten, siehe auch Abbildung 10 auf Seite 26. Grundsätzlich steigen die Temperaturen der Wandpaneele im Deckenbereich schneller an. In dieser Simulation steigt jedoch auch die Temperatur im mittleren Bereich der Kammerwand schnell an. Dies ist durch die zusätzliche Längsströmung zu erklären, welche die hei-



ßen Brandgase von West nach Ost leitet. Es erklärt auch, dass hier die Temperaturen in dem etwas weiter entfernten Bereich 36,6+50,00 stärker ansteigen als in direkter Umgebung zum Brandherd in Bereich 37,7+0,00. In dieser Simulation wird die kritische Temperatur im Bereich 36,6+75,00 bereits nach ca. 16 min erreicht.

Das plötzlich auftretende Tal bei ca. 24 min lässt sich durch das Versagen der Fenster des Zugmodells erklären. Das Modell des Bemessungsbrandes enthält vorgegebene Zeiten, bei denen die Fenster des Zugmodells zerspringen. Durch die größeren Öffnungsflächen kann mehr Rauch aus dem Zug dringen. Durch die zusätzlichen Längsströmungen aus Windbeanspruchung kommt es zu turbulenten Verwirbelungen, welche die heißen Brandgase zunächst von den Wandpaneelen weggleiten.

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.

### 8.1.3 Vergleich der Simulationen 1 und 2 – Tunnel Forst

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse sowohl aus Simulation 1 als auch Simulation 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in Simulation 2 in welche Längsströmungen aus Windbeanspruchung berücksichtigt wurden, die kritische Temperatur früher erreicht wird. Der schnellere Anstieg der Temperaturen lässt sich damit erklären, dass der Verbrennungsprozess aufgrund der zusätzlichen Luftzufuhr des Windes beschleunigt wird.

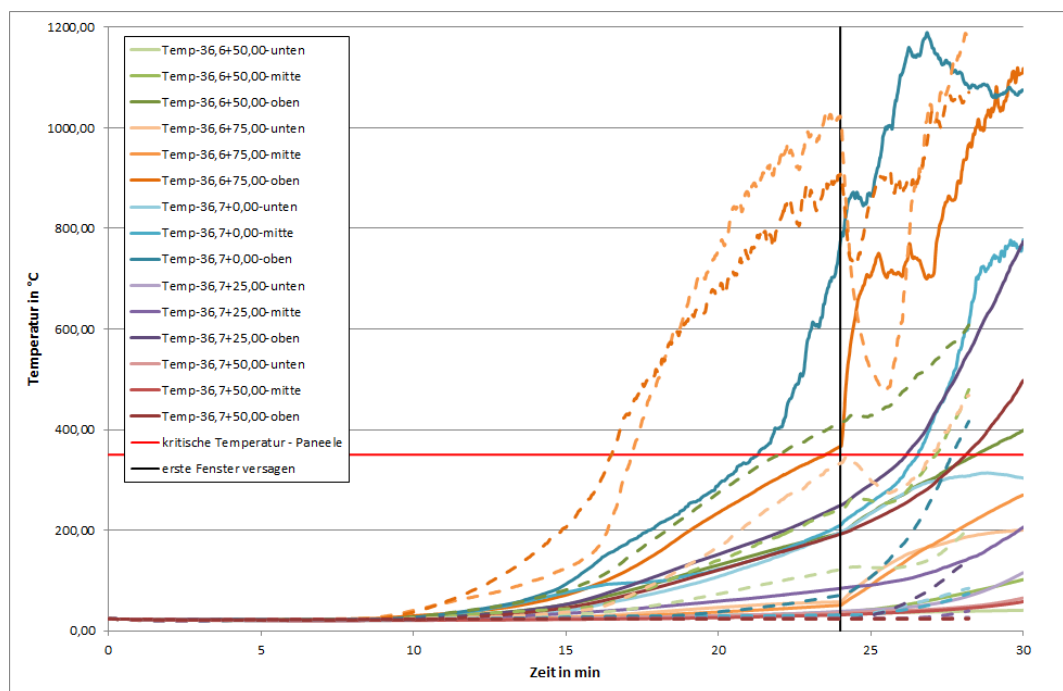


Abbildung 14: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Forst aus den Simulationen 1 und 2

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.



## 8.2 Tunnel Hirsau

### 8.2.1 Ergebnisse aus Simulation 3 – Tunnel Hirsau ohne Wind

Die Simulation 3 umfasst den S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Hirsau. In dieser Simulation wurden keine zusätzlichen Längsströmungen aus Windbeanspruchungen in das Modell implementiert.

Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) ausgewertet. In Abbildung 15 sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt.

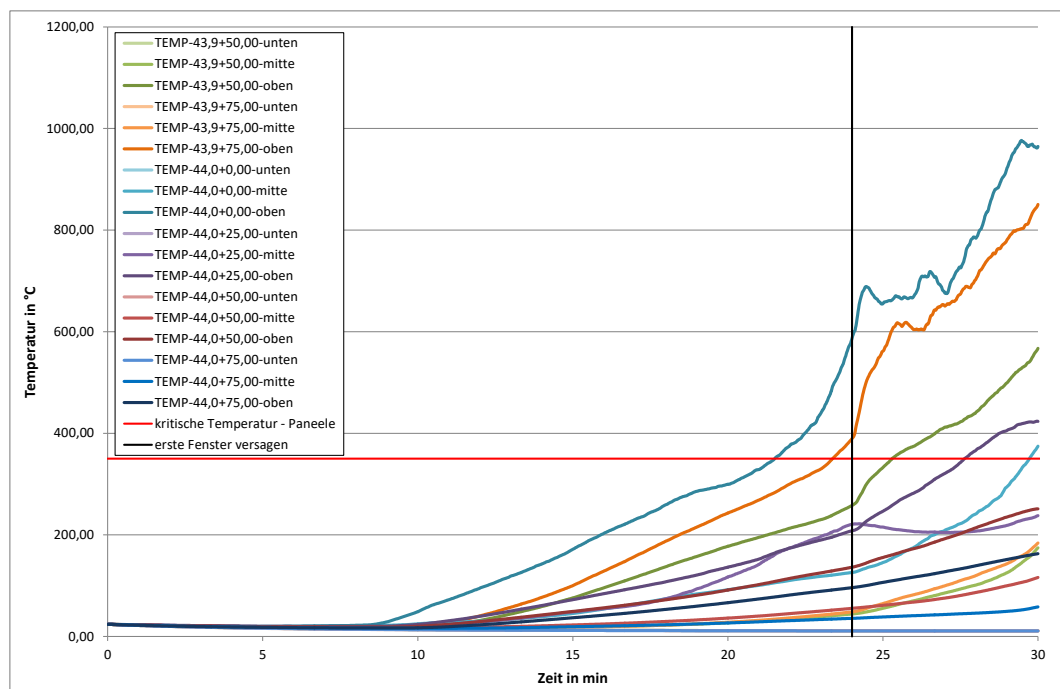


Abbildung 15: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Hirsau aus Simulation 3

Die Temperaturen der Wandpaneele steigen in den Bereichen 44,4+0,00 und 43,9+75,00 am stärksten an. Der Bereich 44,4+0,00 befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Brandereignis in Wagen 1, siehe auch Abbildung 11 auf Seite 27. Der Bereich 39,0+75,00 scheint auf den ersten Blick nicht unmittelbar von dem Brand betroffen zu sein, allerdings weist der Tunnel



eine Längsneigung auf. Grundsätzlich steigen die Temperaturen der Wandpaneele im Deckenbereich schneller an. Durch die Thermik steigen die Rauchgase des Brandes nach oben und somit auch die heißen Brandgase. Dies ist auch der Grund weshalb der Bereich 39,0+75,00 sich ebenfalls stark erwärmt. Die für die Wandpaneele kritische Temperatur von 350 °C wird zuerst im Bereich 44,4+0,00 nach einer Zeitdauer von ca. 22 min erreicht.

Im Gegensatz zu den Simulationen für den Tunnel Forst sind die Veränderungen ab der 24 min aufgrund des Zerspringens der ersten Fenster des Zugmodells nicht ganz so stark ausgeprägt. Es lassen sich jedoch auch für die Simulation 3 deutliche Änderungen der Temperaturkurven feststellen.

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.

### 8.2.2 Ergebnisse aus Simulation 4 – Tunnel Hirsau mit Wind

Die Simulation 4 umfasst den S-Bahn-Bemessungsbrand im Tunnel Hirsau. In dieser Simulation wurden zusätzliche Längsströmungen aus Windbeanspruchungen in das Modell implementiert.

Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) ausgewertet. In Abbildung 16 sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt.

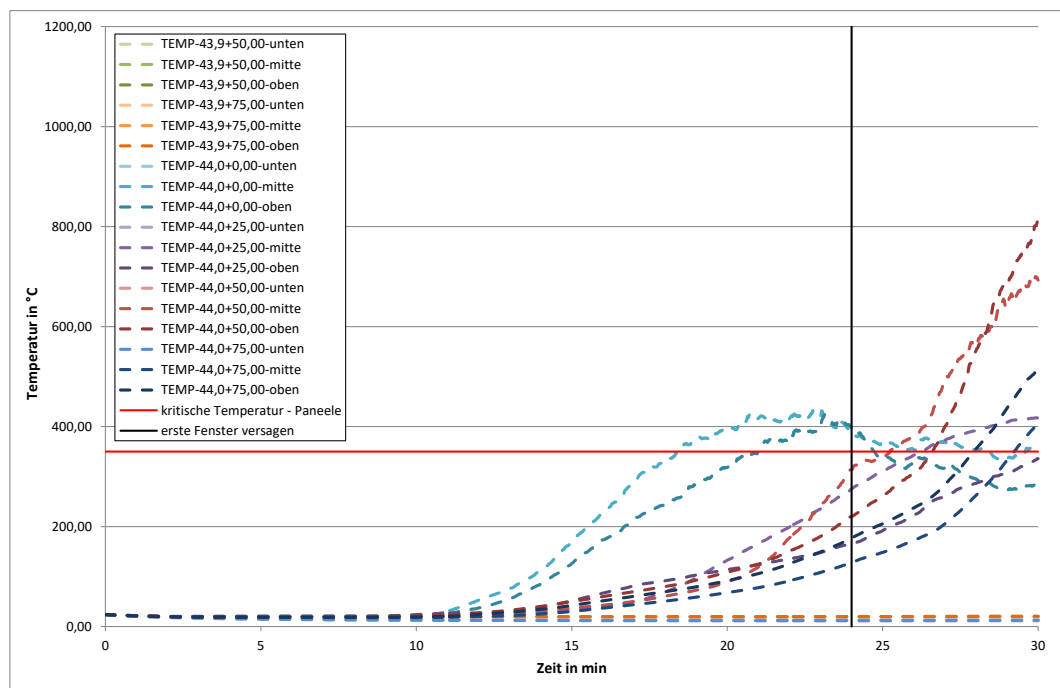


Abbildung 16: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Hirsau aus Simulation 4

Die Temperaturen der Wandpaneele steigen hier im Bereich 44,0+0,00 am stärksten an. Dies ist der Bereich in unmittelbarer Nähe zum Brandereignis. Grundsätzlich steigen die Temperaturen an den Wandpaneelen im Deckenbereich schneller an. In dieser Simulation, analog zur Simulation 2 – Tunnel Forst mit Windbeanspruchung, steigt jedoch auch die Temperatur im mittleren Bereich der Kammerwand schnell an. Dies ist durch die zusätzliche Längsströmung zu erklären. Da der Tunnel von Südwest nach



Nordost verläuft und Krümmungen aufweist, wird die erwärmte Luft durch die aufgeprägten Strömungen in Richtung der Kammerwand geleitet. Für die hier betrachteten Randbedingungen wird die kritische Temperatur für die Wandpaneele im Bereich 44,0+0,00 bereits nach ca. 19 min erreicht.

Das plötzlich auftretende Tal bei ca. 24 min und das Verschieben der starken Temperaturbeanspruchung in Richtung Nordost lassen sich durch das Versagen der Fenster des Zugmodells erklären. Das Modell des Bemessungsbrandes enthält vorgegebene Zeiten, bei denen die Fenster des Zugmodells zerspringen. Durch die größeren Öffnungsflächen kann mehr Rauch aus dem Zug dringen. Durch die größeren Öffnungsflächen kann mehr Rauch aus dem Zug dringen. Durch die zusätzlichen Längsströmungen aus Windbeanspruchung kommt es zu turbulenten Verwirbelungen, welche die Brandgase zunächst von den Wandpaneelen weggleiten und dann stark in Richtung der Längsströmung mitführen.

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.

### 8.2.3 Vergleich der Simulationen 3 und 4 – Tunnel Hirsau

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse sowohl aus Simulation 3 als auch aus Simulation 4 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in Simulation 4, in welcher Längsströmungen aus Windbeanspruchung berücksichtigt wurden, die kritische Temperatur früher erreicht wird. Auch verlagert sich die Beanspruchung der Paneele in nordöstlicher Richtung. Der zunächst schnellere Anstieg der Temperaturen lässt sich damit erklären, dass der Verbrennungsprozess aufgrund der zusätzlichen Luftzufuhr des Windes beschleunigt wird.

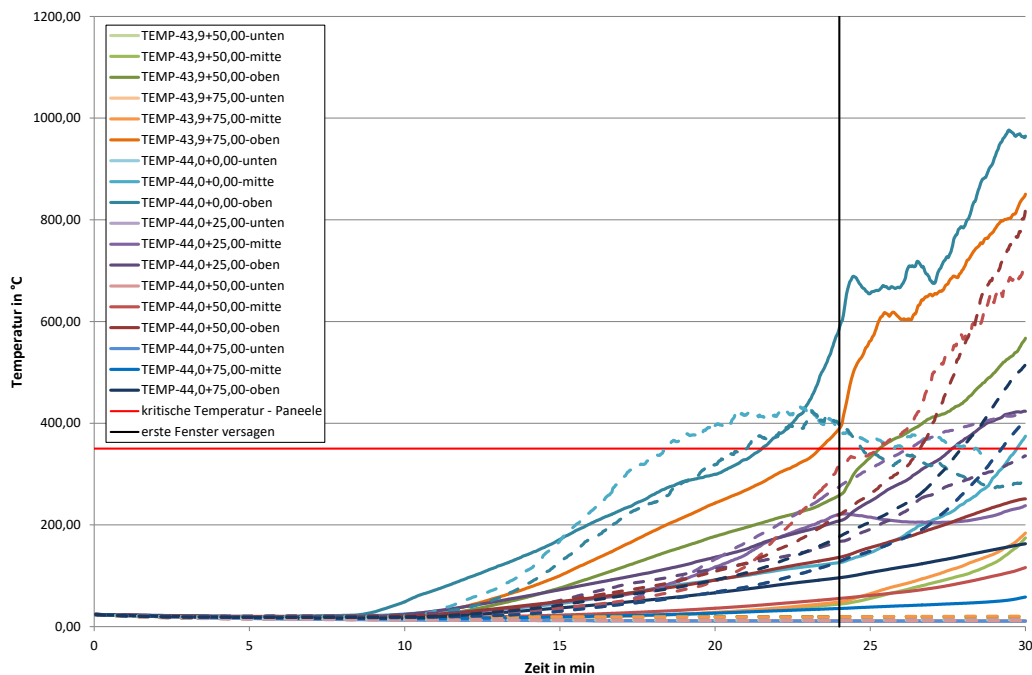


Abbildung 17: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit im Bereich des Brandereignisses im Tunnel Forst aus den Simulationen 3 und 4

Eine Bewertung hinsichtlich der Entfluchtung der sich im Zug befindenden Personen erfolgt im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten.



### 9 Zusammenfassung

Es wurden computerbasierte Simulationen mit FDS den Tunnel Forst und den Tunnel Hirsau entlang der Bahnstrecke Weil der Stadt – Calw durchgeführt. Dabei wurde der S-Bahn-Bemessungsbrand zu Grunde gelegt. Weiterhin wurden die klimatischen und bauphysikalischen Randbedingungen aus den Voruntersuchungen von Kurz und Fischer GmbH berücksichtigt.

Ziel der Feuer- und Rauchgassimulationen ist die Ermittlung der Temperaturverläufe an den Sandwich-Paneelen der Kammerabtrennung für die Ersatzquartiere der Fledermäuse. Die Zeiträume in denen die kritische Temperatur für die Wandpaneele erreicht wird, sind für die Gegenüberstellung mit den benötigten Entfluchtungszeiten erforderlich. Der Auftraggeber möchte sicherstellen, dass keine zusätzliche Gefahr für flüchtende Personen durch Herabfallen von Wandpaneelen besteht.

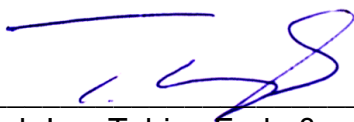
Die Gegenüberstellung mit den Entfluchtungszeiten sowie die abschließende Bewertung sind im Bericht zur Berechnung der Entfluchtungszeiten enthalten.



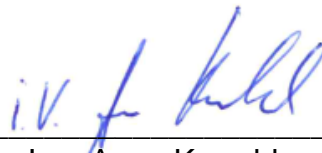
### 10 Ausfertigung

Für diesen Bericht beanspruchen wir den gesetzlichen Urnehmerschutz.  
Vervielfältigungen sind nur ungekürzt und/oder mit unserer Zustimmung  
zulässig. Dieser Nachweis darf nur für Zwecke verwendet werden, die mit  
dem Brandschutz der o.g. Baumaßnahme zusammenhängen.

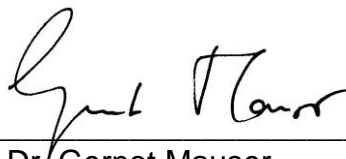
Frankfurt am Main, 21.06.2019  
Endreß Ingenieurgesellschaft mbH  
Brandschutzsachverständige

  
\_\_\_\_\_  
Dipl.-Ing. Tobias Endreß  
Geschäftsführer

erstellt:

  
\_\_\_\_\_  
i.V. Dr.-Ing. Anne Kawohl  
Leiterin Ingenieurmethoden  
Fachplanerin Brandschutz (IngKH)

QS:

  
\_\_\_\_\_  
i.V. Dr. Gernot Mauser  
Leiter Forschung und Ausbildung  
Dipl.-Physiker