

Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

Brandschutzsachverständige

- 🔥 Prüfsachverständige für Brandschutz
- 🔥 Nachweisberechtigte für vorbeugenden Brandschutz
- 🔥 Brandschutzkonzepte für alle Regel- und Sonderbauten im In- und Ausland
- 🔥 Ingenieurmethoden des Brandschutzes
- 🔥 Planung von Feuerlöschanlagen
- 🔥 Brandschutzbeauftragte / Schulungen
- 🔥 Flucht- und Rettungspläne
- 🔥 Feuerwehrpläne

Berechnung der Entfluchtungszeiten

Bauvorhaben	Hermann-Hesse-Bahn Wiederinbetriebnahme der Strecke Weil der Stadt - Calw
Auftraggeber / Entwurfsverfasser	Mailänder Consult GmbH Herr Markus Reinacher Mathystraße 13 76133 Karlsruhe
Bauherr	Zweckverband Hermann-Hesse-Bahn c/o Landratsamt Calw Vogteistraße 42-46 75965 Calw
Ersteller	Dr.-Ing. Anne Kawohl
Projektnummer	5285
Datum	30.06.2022

Dieser Bericht umfasst 42 Seiten und keine Anlagen.

Gesellschafter/Geschäftsführer

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

Geschäftsführer

Dipl.-Ing. (FH) Carsten Steiner
Prüfsachverständiger für Brandschutz
Nachweisberechtigter für
vorbeugenden Brandschutz

Detlev Struckmeier
Kaufmann


Zentrale für Deutschland
Siemensstraße 6
61352 Bad Homburg v.d.H.


+49 6172 39514-50


www.brandschutz-gutachter.de


zentrale@brandschutz-gutachter.de


Taunus Sparkasse
IBAN DE91 5125 0000 0001 0415 41

Commerzbank
IBAN DE23 5004 0000 0480 0280 00

Amtsgericht: Bad Homburg
HRB 15700
Steuernr.: 003 232 41501
UID-Nr.: DE 265 591 693
D-U-N-S: 341390634

Qualifikationen / Mitgliedschaften



Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

Brandschutzsachverständige

Index

Nr.	Datum	Abschnitt	Vorgang, Änderung	Bearbeiter
-	21.06.2019	Gesamt	Erstmaliges Erstellen der Dokumentation	A. Kawohl
1	30.06.2022	Gesamt	Anpassung der Tunnellängen	A. Kawohl

Allgemeines

Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

Brandschutzsachverständige

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Allgemeines.....	5
1.1 Auftrag und Bestimmung dieser Entfluchtungszeitenberechnung.....	5
1.2 Parameter.....	5
1.3 Bedingungen der Berechnung	5
1.4 Verwendete Unterlagen	6
2 Ziel der Berechnung	7
3 Angewandtes Berechnungsverfahren nach Predtečenskij und Milinskij.....	9
3.1 Allgemeines	9
3.2 Abgrenzung zu verwandten Methoden	10
3.3 Personendichte.....	11
3.4 Nichtlineares Verhalten und beschränkte Kapazität	12
3.5 Kontinuitätsbeziehung	14
4 Entfluchtungszeiten für die Tunnel Forst und Hirsau	15
4.1 Berechnung der Verzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug	15
4.2 Entfluchtungszeit für den Tunnel Forst	19
4.2.1 Bauwerkspezifische Parameter	19
4.2.2 Berechnung der Entfluchtungszeiten für den Tunnel Forst.....	20
4.2.3 Vergleich mit den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation	25
4.2.4 Bewertung der Situation im Tunnel Forst.....	28
4.3 Entfluchtungszeiten für den Tunnel Hirsau	30
4.3.1 Bauwerkspezifische Parameter	30
4.3.2 Berechnung der Entfluchtungszeiten für den Tunnel Hirsau.....	31
4.3.3 Vergleich mit den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation	36
4.3.4 Bewertung der Situation im Tunnel Hirsau.....	39

Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

Brandschutzsachverständige

5	Zusammenfassung	41
6	Ausfertigung	42

1 Allgemeines

1.1 Auftrag und Bestimmung dieser Entfluchtungszeitenberechnung

Der Endreß Ingenieurgesellschaft mbH Brandschutzsachverständige wurde der Auftrag zur Berechnung der Entfluchtungszeiten und dem Vergleich dieser Ergebnisse mit den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation für o.g. Objekt erteilt.

1.2 Parameter

Neben der Anzahl der Personen, die aus einer baulichen Anlage flüchten, sind die räumlichen Verhältnisse die wesentlichen Parameter zur Berechnung der Bewegungszeit respektive der Entfluchtungszeit.

Dazu gehören etwa Weglängen und Wegbreiten. Ganz wesentlich sind dabei die Engstellen, die nur einen begrenzten Durchgang von Personen pro Zeiteinheit erlauben und daher zu Staus oder Wartezeiten führen. In dem hier betrachteten Objekt ist die maßgebende Engstelle nicht etwa die Türbreite des Zuges, sondern der Rettungsweg neben dem Gleisbett.

1.3 Bedingungen der Berechnung

Die Berechnung der Entfluchtungszeiten erfolgt getrennt für die beiden Tunnel Forst und Hirsau. Für die Berechnung wird ein anerkanntes Handrechenverfahren verwendet.

Für die Berechnung der Entfluchtungszeiten werden die gleichen Randbedingungen wie für die Feuer- und Rauchgassimulation angesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass der Zug in Tunnelmitte zum Stehen kommt. Es werden die geometrischen Abmessungen des Zugmodells aus der Brandsimulation (Zugseinheit ET 423) angesetzt. Weiterhin wird die maximale Personenanzahl für eben diese Zugseinheit ET 423 von 544 Personen für die Berechnung zu Grunde gelegt. Sowohl die Angaben zur Geo-

metrie als auch zu der maximalen Personenzahl stammen aus dem Anwenderhandbuch „Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr“, siehe Tabelle 2.

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 ¹

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
Personenströme in Gebäuden - Berechnungsverfahren für die Projektierung	W. M. Predtečenskij, A. I. Milinskij	1971
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
Feuer- und Rauchgassimulation – Hermann-Hesse-Bahn	Endreß Ingenieurgesellschaft mbH	21.06.2019

Tabelle 2: Sonstige verwendete Unterlagen

¹ DR. SPANG Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH

Ziel der Berechnung

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.

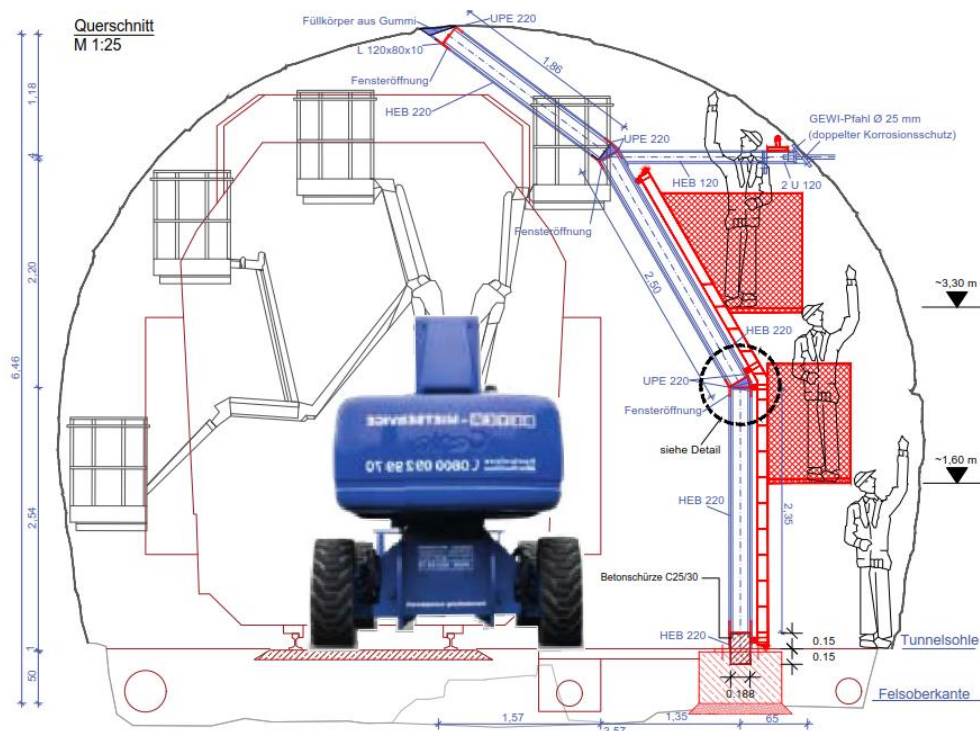


Abbildung 1: Darstellung Tunnelquerschnitt „Kammerlösung“, Quelle: DR. SPANG Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH

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 Berechnung ist die Gegenüberstellung der notwendigen Zeit für die Evakuierung der Personen aus dem Zug zu der Zeit, in welcher die Schallschutzpaneele die kritische Temperatur erreichen.

Durch Berechnungs- oder Simulationsverfahren wird nur die Zeit der reinen Selbstrettungsphase beziehungsweise Bewegungszeit festgestellt.

3 Angewandtes Berechnungsverfahren nach Predtečenskij und Milinskij

3.1 Allgemeines

Die Bewegungszeiten vom Beginn der allgemeinen Evakuierungsbewegung bis zum Zeitpunkt, an dem alle Fliehenden einen sicheren Bereich erreicht haben, werden mit dem Verfahren von Predtečenskij und Milinskij² ausgeführt.

Dabei wird die reine Bewegungszeit nach dem Einsetzen der Bewegung oder der Flucht ermittelt. Verzögerungen durch Fahrzeiten, Entscheidungsfindung oder überwiegend psychologische Prozesse sind in diesem Modell nicht enthalten.

Das Verfahren wurde als „Handberechnungsverfahren“ ausgelegt, das sich besonders dazu eignet, im Verlauf der Berechnung die Auswirkung einzelner Bauelemente auf den zu erwartenden Personenstrom zu erfassen. Bei komplexen Bauwerken werden jedoch meist wegen der hohen Anzahl an Rechenoperationen und der besseren Überprüfbarkeit Tabellenkalkulationsprogramme eingesetzt.

Das Verfahren und alle verwendeten Parameter sind in der Fachliteratur vollständig beschrieben. Im deutschen Sprachgebrauch wird die Übersetzung der Originalmonographie³ der russischen Autoren verwendet:

W. M. Predtečenskij, A. I. Milinskij: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsmethoden für die Projektierung, Köln-Braunsfeld 1971

² Die Schreibweise der russischen Namen entspricht der in Deutschland überwiegend verwendeten Transliteration der kyrillischen Schrift nach DIN 1460, welche auch im Duden angegeben wird. Andere Schreibweisen der Namen sind jedoch sowohl in der englischen Fachliteratur als auch in der Fachliteratur, die in der DDR oder in Lizenz der Verlage der DDR herausgegeben wurden, durchaus üblich.

³ В. М. Предтеченский, А. И. Милинский: Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков, Москва 1969

Das empirisch-phänomenologische Verfahren beruht im Wesentlichen auf umfangreichen Messungen von Personenbewegungen in einem sehr weiten Bereich der Personendichte und in unterschiedlichen baulichen Situationen.

Diese Messwerte wurden in gemittelter Form in der Monographie tabelliert und parametrisiert.

Die Verfahrensschritte und die Formeln sind als systematischer Teil der Theorie Folge der von den Autoren konsequent genutzten Kontinuitätsbedingung, der Personenzahlerhaltung.

Ein besonderer Aspekt der praktischen Verwendbarkeit des Verfahrens ist seine Formulierung und überwiegende Anwendung auf einfache lineare Baukörper wie Flure gleichbleibender Breite, Treppen sowie Rampen, die mit einander verkettet werden können. Komplexere Elemente wie Gänge mit Breitenunterschieden werden aus einfacheren Elementen approximiert.

3.2 Abgrenzung zu verwandten Methoden

Die hier beschriebene Methode bildete die Grundlage für viele vereinfachte Beschreibungen. Ein derartig vereinfachtes Verfahren wird im Rahmen der DIN EN 13200⁴ verwendet. Ein anderes auf dieser Grundlage stehendes und stark vereinfachtes Verfahren wird in der NFPA 130⁵ aufgeführt. Bei diesen Verfahren weichen die Parameter wegen der Natur ihrer Vereinfachungen aber auch durch pragmatische Festlegungen sowohl untereinander als auch von denen durch die Autoren Predtečenskij und Milinskij ermittelten Messwerte wesentlich ab. Es führt daher zu falschen Ergebnissen, Parameter aus unterschiedlichen Berechnungsverfahren zu mischen.

⁴ Normenreihe DIN EN 13200: Zuschauieranlagen

⁵ NFPA 130: Standard for Fixed Guideways Transit and Passenger Rail Systems

3.3 Personendichte

Die wesentliche Größe für die Bestimmung von Entfluchtungszeiten ist in der Methode von Predtečenskij und Milinskij die Personendichte, welche sich aus den vorgegebenen Personenzahlen und Raumverhältnisse einer baulichen Anlage ergibt.

Diese Dichte wird bei Predtečenskij und Milinskij in der Einheit m^2/m^2 gemessen. Damit wird das Verhältnis der senkrecht auf eine horizontale Laufläche projizierten Fläche, die von Personen beansprucht wird, zur vorhandenen horizontalen Laufläche angegeben.

Alter, Bekleidung und Gepäck der Personen	Fläche f in m^2
Kind	0,04...0,06
Jugendlicher	0,06...0,09
Erwachsener	
in Sommerkleidung bzw. Hauskleidung	0,100
in Übergangsstraßenkleidung	0,113
in Winterstraßenkleidung	0,125
Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung	
mit leichtem Gepäck (z. B. Aktentasche)	0,180
mit einem Koffer	0,240
mit Rucksack	0,260
mit schwerem Gepäck (z. B. zwei Koffer)	0,390
mit einem Kind an der Hand	0,200
mit einem Kind auf dem Arm	0,260
mit einem Kind an der Hand (einschl. Gepäck)	0,320

Tabelle 3: Beanspruchte Flächen von Personen nach Predtečenskij und Milinskij⁶

Praktisch wird eine Person in diesem Verfahren – von oben gesehen – auf ihren größten Querschnitt reduziert. Allerdings werden dabei die Art der Bekleidung und die Ausstattung mit Taschen und Koffern berücksichtigt.

⁶ W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971, Seite 42: Tabelle 2

Begrenzt wird diese Methode durch sehr große Personendichten, die mit starken Kräften zwischen den Personen verbunden sind, so dass Bekleidung, Gepäckstücke oder die Körpergestalt der Personen verformt werden könnten.

Diese Dichteformulierung erlaubt es, Personen unterschiedlicher Größe, etwa Erwachsene und Kinder, zu berücksichtigen. Unterschneidungen, die unterschiedliche Höhenlage der maximalen horizontalen Ausdehnungen von Personen, kann hingegen nicht berücksichtigt werden.

In den hier vorliegenden Berechnungen wird der Personenflächenparameter für alle Personen auf $f = 0,180$ (Erwachsener in Übergangsstraßenkleidung mit leichtem Gepäck) festgelegt. Dieser Wert kann als Mittelwert über alle betrachteten Personen angesehen werden.

3.4 Nichtlineares Verhalten und beschränkte Kapazität

Die Geschwindigkeit (v), mit der sich eine Gruppe von Personen durch ein Gebäude bewegt, hängt stark nicht-linear von der beschriebenen Personendichte ab, siehe Abbildung 2. Dies ist ein wesentliches, empirisches Ergebnis von Predtečenskij und Milinskij: Die Werte der Geschwindigkeit wurden als Medianwerte aus einer großen Anzahl an Personenbewegung im Umfeld des öffentlichen Nahverkehrs ermittelt.

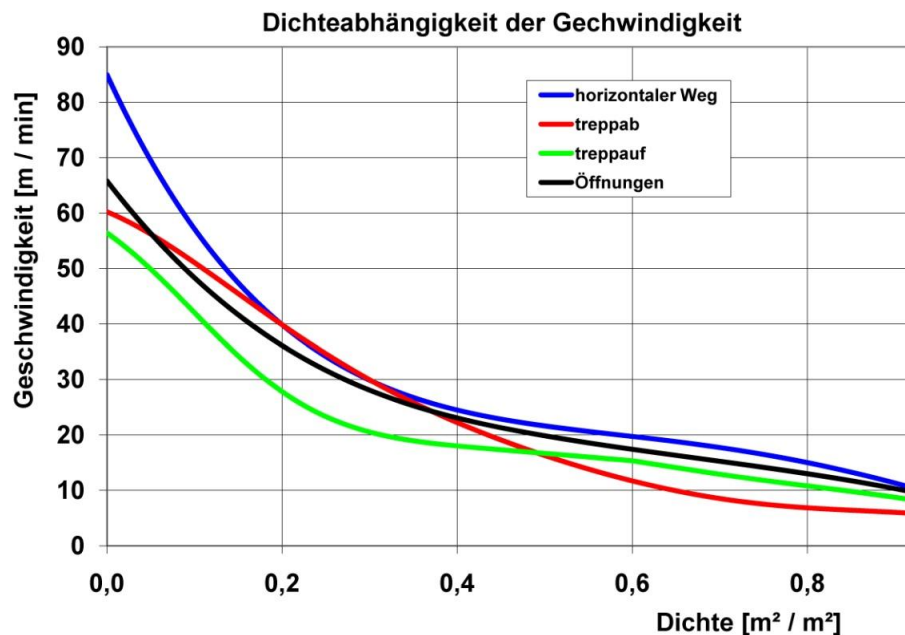


Abbildung 2: Geschwindigkeit einer Menschengruppe in Abhängigkeit der Personendichte⁷, dargestellt für unterschiedliche Bauteile. Typisch auftretende Öffnungen sind Türen.

Predtečenskij und Milinskij unterscheiden dabei drei Bewegungsarten: Personenbewegung unter Gefahrenbedingungen, Bewegung unter Normalbedingungen und Bewegung unter Komfortbedingungen. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Bewegung unter Gefahrenbedingungen schneller ist als unter Normalbedingungen und eine Bewegung unter Komfortbedingungen langsamer als unter Normalbedingungen.

In den hier durchgeführten Berechnungen werden die Geschwindigkeiten unter Gefahrenbedingungen angesetzt. Trotz der größeren Bewegungsgeschwindigkeiten ist dies zeitgleich ein realistischer als auch ein konservativer Ansatz. Durch die schnellere Bewegung kommt es bei hohen Personendichten Engstellen wie z.B. Türen oder engen Gängen zu Staubilddung und somit zu längeren Entfluchtungszeiten.

⁷ vgl. W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971

Für die Berechnung haben Predtečenskij und Milinskij die Bewegungsintensität q als Produkt von Dichte und Geschwindigkeit und die Durchlassfähigkeit Q als Produkt der Bewegungsintensität und der Durchlassbreite eingeführt.

Diese Größen basieren auf dem grundlegenden Prinzip, der Erhaltung der Personenzahl. Die Bewegungsintensität entspricht physikalisch der Stromdichte einer zweidimensionalen Strömung und die Durchlassfähigkeit dem Fluss einer zweidimensionalen Strömung durch eine Öffnung. Bei einer Veränderung der Durchlassbreiten muss sich bei gleichem Fluss die Bewegungsintensität verändern. Bei einer Verengung kann die Bewegungsintensität jedoch nicht über ihren Maximalwert steigen, so dass es zum Stau kommen kann.

3.5 Kontinuitätsbeziehung

Entsprechend dem grundlegenden Erhaltungssatz der Personenzahl gilt ein Verzweigungssatz für den Personenfluss.

Die Gesamtzeit, die eine Personenansammlung benötigt um etwa ein Bauwerk zu verlassen, setzt sich in dem Modell von Predtečenskij und Milinskij aus der Summe der Bewegungszeiten in einzelnen Abschnitten und der Summe der Stauzeiten zusammen, die bei Verengungen oder Personenzusammenführungen auftreten können. Die Stauzeiten sind als Folge von Kapazitätsveränderungen zwischen den Abschnitten beschrieben.

4 Entfluchtungszeiten für die Tunnel Forst und Hirsau

Bei der Berechnung von Bewegungszeiten von Personenströmen sind Engstellen der maßgebende Parameter für die Ermittlung der benötigten Zeit. Für beide hier betrachteten Tunnel besteht die maßgebende Engstelle aus dem Ausstieg aus dem Zug auf den Rettungsweg. Die Breite des Rettungswegs neben der Schienenanlage beträgt 1,20 m. Die Gesamtlänge des Zugs beträgt ca. 60 m. Der Zug besteht aus 4 Wagen mit jeweils 3 Türen. Die Türen besitzen jeweils eine lichte Breite von 1,40 m.

Diese Randbedingungen sind in beiden Tunnelanlagen gleich, daher wird diese Situation zunächst allgemein für beide betrachtet.

4.1 Berechnung der Verzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug

Für den betrachteten Personenzug Zugeinheit ET 423 wird die folgende Personenanzahl und damit eine Vollbesetzung angesetzt:

Sitzplätze: $P_{Sitz} = 192$ Pers

Stehplätze: $P_{Steh} = 352$ Pers (entspricht 4 Pers / m²)

Zug: $P_{Zug} = P_{Sitz} + P_{Steh} = 544$ Pers⁸

Wie bereits in Kapitel 3.3 genauer erläutert wird für die von den Personen beanspruchte Fläche der Wert für Erwachsene in Übergangsstraßenkleidung mit leichtem Gepäck angenommen:

$$f = 0,180 \text{ m}^2$$

Unter der Annahme von 4 Pers / m² innerhalb des Zuges folgt für die Personendichte:

$$D = \frac{P \cdot f}{1 \text{ m}^2} = \frac{4 \cdot 0,18 \text{ m}^2}{1 \text{ m}^2} = 0,72 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$$

⁸ A. Haack, J. Schreyer, 2010, Seite 5

Für die weitere Berechnung wird je Tür ein Zugabschnitt betrachtet:

$$\frac{544 \text{ Pers}}{12 \text{ Türen}} = 46 \frac{\text{Pers}}{\text{Tür}}$$

Es werden für die Berechnung die Werte der Geschwindigkeit und Bewegungsintensität für Gefahrenbedingungen angesetzt. Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, handelt es sich um einen konservativen Rechenansatz.

Für die Bewegung vor der jeweiligen Tür, also innerhalb des Zuges ergibt sich:

$$D_{\text{Zug}} = 0,72 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$$

$$q_{\text{Zug}} = 13,10 \frac{\text{m}}{\text{min}}^9$$

$$Q_{\text{Zug}} = q_{\text{Zug}} \cdot b_{\text{Tür}} = 13,10 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1,4 \text{ m} = 18,34 \frac{\text{m}^2}{\text{min}}$$

Nach Verlassen des Zuges wird von den Personen der Rettungsweg (Notweg) mit $b_{\text{Weg}} = 0,9 \text{ m}$ durchschritten. Somit ergibt sich für die rechnerische Bewegungsintensität:

$$q_{\text{Weg}} = q_{\text{Zug}} \cdot \frac{b_{\text{Tür}}}{b_{\text{Weg}}} = 13,10 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot \frac{1,4 \text{ m}}{1,2 \text{ m}} = 15,28 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Für horizontale Wege unter Gefahrenbedingungen ist die maximale Bewegungsintensität jedoch:

$$q_{\text{max,Weg}} = 12,42 \frac{\text{m}}{\text{min}}^{10}$$

und somit ist:

$$q_{\text{Weg}} > q_{\text{max,Weg}}$$

⁹ vgl. W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971: Anhang 1: Tabelle Wegeinengungen und Durchgänge, Gefahrenbedingungen

¹⁰ vgl. W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971: Anhang 1: Tabelle Horizontale Wege, Gefahrenbedingungen

Da die maximale Bewegungsintensität nicht überschritten werden kann, hat dies also zur Folge, dass sich bei Verlassen des Zuges ein Stau bildet. Das heißt, dass die Personendichte vor dem Zug (nach dem Aussteigen) auf den Maximalwert also $0,92 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ansteigt. Somit ergeben sich die folgenden Werte für die Bewegung auf dem Rettungsweg:

$$v_{weg} = 10,52 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$q_{weg} = 9,68 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$Q_{weg} = q_{weg} \cdot b_{weg} = 9,68 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 1,2 \text{ m} = 11,62 \frac{\text{m}^2}{\text{min}}$$

Die zeitliche Verzögerung, die sich durch die Bildung des Staus ergibt, ist abhängig von der Personenzahl:

$$\tau_{Stau} = \frac{P \cdot f}{Q_{weg}} = \frac{46 \cdot 0,180 \text{ m}^2}{11,62 \text{ m}^2/\text{min}} = 0,71 \text{ min}$$

An dieser Stelle ist zu kontrollieren, ob es neben der Verzögerung aus der Staubildung noch eine weitere Verzögerung durch die Bewegung innerhalb des Zuges ergibt. Die Länge des Personenstroms innerhalb des Zugs kann vereinfachend wie folgt angenommen werden:

$$l_{Strom} = \frac{46 \cdot 0,180 \text{ m}^2}{1,4 \text{ m}} \approx 6 \text{ m}$$

Es wird davon ausgegangen, dass der kurze Weg zum Ende des Personenstroms innerhalb des Zuges in der Wartezeit untergeht. Ohne die Staubildung ergibt sich die Zeit bis alle Personen aus der Tür ausgestiegen sind zu:

$$t_{Ausstieg} = \frac{l_{Strom}}{v_{weg}} = \frac{6 \text{ m}}{10,52 \text{ m}/\text{min}} = 0,57 \text{ min}$$

Da diese Dauer kleiner ist als die Verzögerung durch die Staubildung, geht die Bewegungszeit innerhalb des Zuges und dem Ausstieg in der Wartezeit des Staus unter.

Beim Ausstieg aus dem Zug müssen die Personen einen Höhenunterschied überwinden. Es kann davon ausgegangen, dass die Zeit des Abstiegs aus dem Zug im Wesentlichen in der Wartezeit des Staus untergeht. Der Wert wird jedoch aufgerundet, um dies zu berücksichtigen:

$$\tau_{\text{Stau}} = 1,0 \text{ min}$$

Da $\tau_{\text{Stau}} > t_{\text{Ausstieg}}$ können die Verzögerungen pro Tür einfach aufaddiert werden, da die Personen aus der nachliegenden Tür erst ihre Bewegung fortsetzen können, wenn die Personen aus der davorliegenden Tür alle ausgestiegen sind und sich weiterbewegt haben.

4.2 Entfluchtungszeit für den Tunnel Forst

4.2.1 Bauwerkspezifische Parameter

Der Tunnel Forst hat eine Gesamtlänge von 856 m. Für die Feuer- und Rauchgassimulation wurde der Zug in Tunnelmitte positioniert, da dies hinsichtlich der Entfluchtung aus dem Tunnel die ungünstigste Stelle darstellt.

Die Breite des Rettungsweges beträgt $b_{Weg} = 1,2$ m.

Die Breite des Tunnels ohne die Kammer beträgt $b_{Tunnel} = 6,0$ m.

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.

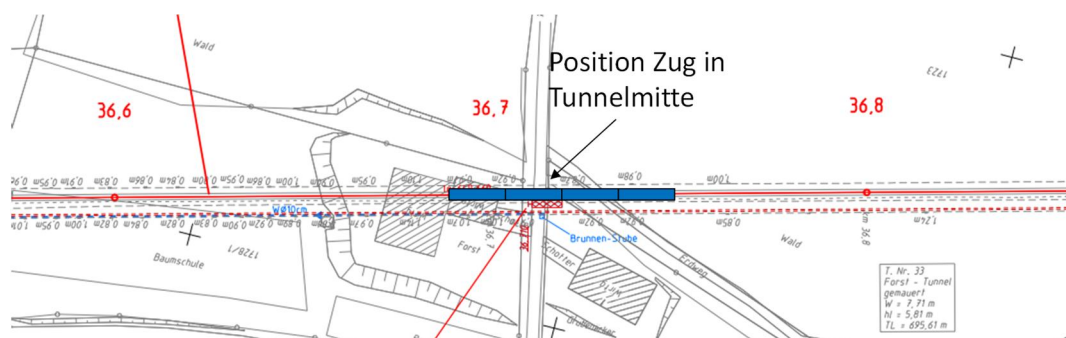


Abbildung 3: Positionierung des Zugs in Mitte des Tunnels Forst (Ausschnitt aus Lageplan 09)

4.2.2 Berechnung der Entfluchtungszeiten für den Tunnel Forst

Im Folgenden werden vier unterschiedliche Varianten von möglichen Verhaltensweisen der fliehenden Personen betrachtet.

Variante 1:

Es wird angenommen, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, aber während der gesamten Strecke durch den Tunnel auf dem gekennzeichneten Rettungsweg verbleiben und das Gleisbett nicht betreten.

Pro Richtung fliehen somit Personen aus 6 Türen und die Gesamtverzögerungszeit ergibt sich pro Richtung zu:

$$\tau_{Ges} = 6 \cdot 1 \text{ min} = 6 \text{ min}$$

Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich zu:

$$t_{Zugende} = \frac{l_{Zug} / 2}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$t_{25m} = \frac{l_{Zug} / 2 + 25 \text{ m}}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{60 \text{ m} / 2 + 25 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 11 \text{ min}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$t_{Evak,Ges} = \frac{l_{Tunnel} / 2}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{856 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 47 \text{ min}$$

Variante 2:

Es wird angenommen, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen, aber während der gesamten Strecke durch den Tunnel auf dem gekennzeichneten Rettungsweg verbleiben und das Gleisbett nicht betreten.

Die Gesamtverzögerungszeit muss daher die Personen aus allen 12 Türen berücksichtigen und ergibt sich somit zu:

$$\tau_{Ges} = 12 \cdot 1 \text{ min} = 12 \text{ min}$$

Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich zu:

$$t_{Zugende} = \frac{l_{Zug}}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$t_{25m} = \frac{l_{Zug} + 25 \text{ m}}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{60 \text{ m} + 25 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 20 \text{ min}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist ergibt sich zu:

$$t_{Evak,Ges} = \frac{l_{Tunnel} / 2}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{856 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 53 \text{ min}$$

Variante 3:

Es wird angenommen, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, jedoch sobald dies möglich ist (nach Verlassen des Bereichs des Zuges) die volle Breite des Tunnels (ohne Kammer) zur Flucht verwenden, also auch das Gleisbett benutzen.

Die Gesamtverzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug ergibt sich Analog zu Variante 1 zu:

$$\tau_{Ges} = 6 \cdot 1 \text{ min} = 6 \text{ min}$$

Da im Tunnel eine größere Breite ($b_{Tunnel} = 6,0 \text{ m}$) und damit größere Fläche zur Verfügung steht, verändert sich die Bewegungsintensität zu:

$$q_{Tunnel} = q_{Weg} \cdot \frac{b_{Weg}}{b_{Tunnel}} = 9,68 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot \frac{1,2 \text{ m}}{6,0 \text{ m}} = 1,94 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Für die Bewegung innerhalb des Tunnels ergibt sich somit¹¹:

$$D_{Tunnel} \approx 0,03$$

$$v_{Tunnel} = 75,25 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Im Bereich des Zuges ist weiterhin nur der Rettungsweg nutzbar. Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich analog zu Variante 1 somit zu:

$$t_{Zugende} = \frac{l_{Zug} / 2}{v_{Weg}} + \tau_{Ges} = \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min}$$

¹¹ vgl. W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971: Anhang 1: Tabelle Horizontale Wege, Gefahrenbedingungen

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{25m} &= \frac{l_{\text{Zug}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \frac{25 \text{ m}}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{25 \text{ m}}{75,25 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min} \end{aligned}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{\text{Evak,Ges}} &= \frac{l_{\text{Zug}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \frac{(l_{\text{Tunnel}} - l_{\text{Zug}}) / 2}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{(856 \text{ m} - 60 \text{ m}) / 2}{75,25 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 14 \text{ min} \end{aligned}$$

Variante 4:

Es wird angenommen, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen, jedoch sobald dies möglich ist (nach Verlassen des Bereichs des Zuges) die volle Breite des Tunnels (ohne Kammer) zur Flucht verwenden, also auch das Gleisbett benutzen.

Die Gesamtverzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug ergibt sich Analog zu Variante 2 zu:

$$\tau_{\text{Ges}} = 12 \cdot 1 \text{ min} = 12 \text{ min}$$

Für die Bewegung innerhalb des Tunnels ergibt sich analog zu Variante 3:

$$v_{\text{Tunnel}} = 75,25 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Im Bereich des Zuges ist weiterhin nur der Rettungsweg nutzbar. Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich analog zu Variante 2 somit zu:

$$t_{\text{Zugende}} = \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{25\text{m}} &= \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \frac{25 \text{ m}}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{25 \text{ m}}{75,25 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min} \end{aligned}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{\text{Evak,Ges}} &= \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \frac{(l_{\text{Tunnel}} - l_{\text{Zug}}) / 2}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{(856 \text{ m} - 60 \text{ m}) / 2}{75,25 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 22 \text{ min} \end{aligned}$$

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Entfluchtungszeiten für den Tunnel Forst zusammengestellt.

Variante	$t_{Zugende}$	t_{25m}	$t_{Evak,Ges}$
Variante 1: Flucht in beide Richtungen es wird nur der Rettungsweg genutzt	9 min	11 min	47 min
Variante 2: Flucht in eine Richtung es wird nur der Rettungsweg genutzt	18 min	20 min	53 min
Variante 3: Flucht in beide Richtungen es wird der gesamte Tunnelquerschnitt genutzt	9 min	9 min	14 min
Variante 4: Flucht in eine Richtung es wird der gesamte Tunnelquerschnitt genutzt	18 min	18 min	22 min

Tabelle 4: Zusammenstellung Entfluchtungszeiten Tunnel Forst

4.2.3 Vergleich mit den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation

In der Feuer- und Rauchgassimulation wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber der Bemessungsbrand für einen S-Bahn-Brand angesetzt. Das Hauptaugenmerk bei der Simulation galt der Temperaturentwicklung an den Wandelementen der abgetrennten Kammer.

Als kritische Temperatur wurde von Seiten des Fachplaners DR. SPANG Ingenieurgesellschaft mbH $T_{crit} = 350 \text{ °C}$ angegeben¹². 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. Ab dieser Temperatur besteht somit die Gefahr, dass flüchtende Personen von herabfallenden Paneelen verletzt werden.

Da die Temperaturen im Bereich der Decke aufgrund der aufsteigenden Rauchgase höher sind als in Bodennähe, ist der Vergleich trotz der für

¹² mündliche Mitteilung durch Herrn Esslinger, DR. SPANG Ingenieurgesellschaft mbH, im Rahmen der Telefonkonferenz am 06.12.2018

Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) getrennt ausgewertet. In Abbildung 5 (Seite 27) sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt. Die gestrichelt dargestellten Kurven stammen aus der Simulation mit Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung (Längsströmung in Richtung des Tunnels). Hier steigen die Temperaturen schneller an, da durch die zusätzliche Luftzufuhr des Windes der Verbrennungsprozess aufgrund des zusätzlichen Sauerstoffs beschleunigt wird.

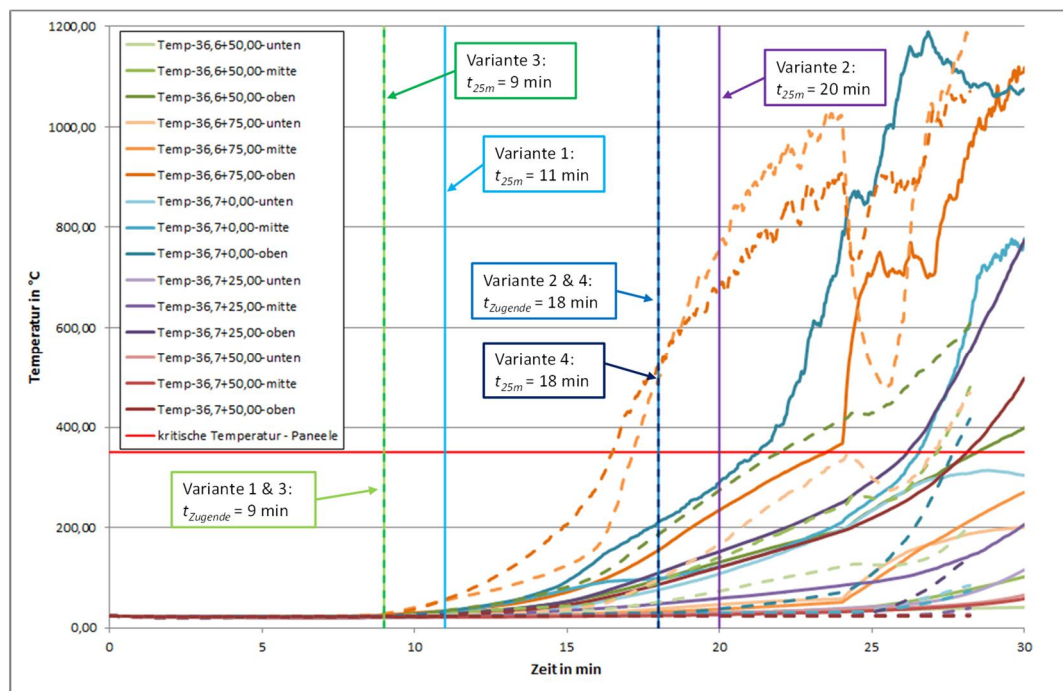


Abbildung 5: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit mit Angabe der verschiedenen Entfluchtungszeiten und der kritischen Temperatur

Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die kritische Temperatur ohne Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung im Bereich des Zuges nach ca. 21 min erreicht wird. Dies betrifft die Paneele im oberen Bereich (Decke). Unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung (Beaufort 6 – starker Wind¹³) wird die kritische Temperatur bereits nach ca. 16 min erreicht.

Die für Variante 1 und 3 berechneten Entfluchtungszeiten für den Bereich des Zuges bzw. in einer Entfernung von ca. 25 m vom Zug liegen unter der Zeitdauer, in der die kritische Temperatur erreicht wird.

¹³ In den Voruntersuchungen von Kurz und Fischer GmbH (E. Fischer, 31.05.2017) wurde im Tunnel Forst eine mittlere Windgeschwindigkeit von 0,4 m/s gemessen. Aufgrund von den Angaben zu den klimatischen Verhältnissen am Tag der Messungen kann von Windverhältnissen entsprechend Beaufort 2 bis 3 ausgegangen werden. Für die Simulation wurde ein stärkerer Wind (Beaufort 6) angenommen und die mittlere Windgeschwindigkeit im Tunnel entsprechend interpoliert.

Für die Varianten 2 und 4 trifft dies nur im Vergleich mit den Werten aus der Simulation ohne Windbeanspruchung zu. Mit Windbeanspruchung liegen die Entfluchtungszeiten nach Erreichen der kritischen Temperaturen in den Wandpaneelen im mittleren und oberen Bereich der Abtrennung im Abschnitt 36,6+75,00.

4.2.4 Bewertung der Situation im Tunnel Forst

Es wurden vier unterschiedliche Varianten von eventuellen Verhaltensweisen der Personen während der Entfluchtung betrachtet. Die berechneten Entfluchtungszeiten geben den Zeitpunkt an, an dem die letzte Person einen bestimmten Standort erreicht bzw. durchschritten hat.

Bei den Varianten 1 und 3, bei denen angenommen wurde, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, liegen die Entfluchtungszeiten der Personen für den unmittelbaren Bereich unterhalb der Zeit, in der die kritische Temperatur in den Wandpaneelen erreicht wird.

Bei den Varianten 2 und 4 liegen die berechneten Entfluchtungszeiten zeitlich nach Erreichen der kritischen Temperatur im Abschnitt 36,6+75,00. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Variante 2 und 4 davon ausgegangen wird, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen. Die Temperatur steigt im Abschnitt 36,6+75,00 schneller an, da dort – in Wagen 1 und Wagen 2 – das Brandereignis verortet ist und zusätzlich die heißen Brandgase durch die Windrichtung (von West nach Ost, von rechts nach links in Abbildung 4 auf Seite 26) vom Zug weg geleitet werden. Die Annahme der Flucht der Personen in nur eine Richtung beinhaltet die Annahme, dass die Personen entgegengesetzt zum Brandereignis flüchten und somit diesen Abschnitt bereits verlassen haben, wenn die Wandpaneele die kritische Temperatur erreichen. Die Annahme beinhaltet jedoch auch, dass die Personen in diesem Fall entgegen der Windrichtung fliehen. Eine Flucht in Windrichtung, bei einer Verortung des Brandes in einem anderen Teil des Zuges, wurde nicht untersucht.

Wie bereits erwähnt, geben die Entfluchtungszeiten jeweils an, wann die letzte Person einen bestimmten Standort erreicht bzw. durchschritten hat. Es ist daher in Bezug auf die kritische Temperatur der Wandpaneele nicht von Belang, dass die Zeitdauer, bis alle Personen den Tunnel vollständig verlassen haben, für die betrachteten Varianten 1 und 2 weit nach Erreichen der kritischen Temperatur im direkten Umfeld des Zuges liegt. Die Personen haben diesen Bereich der Brandumgebung schon verlassen, bis dort die kritische Temperatur erreicht wird.

Für den Tunnel Forst ist damit nachgewiesen, dass für flüchtende Personen keine Gefahr durch herabfallende Teile der Kammerverkleidung besteht.

4.3 Entfluchtungszeiten für den Tunnel Hirsau

4.3.1 Bauwerkspezifische Parameter

Der Tunnel Hirsau hat eine Gesamtlänge von 753 m. Für die Feuer- und Rauchgassimulation wurde der Zug in Tunnelmitte positioniert, da dies hinsichtlich der Entfluchtung aus dem Tunnel die ungünstigste Stelle darstellt.

Die Breite des Rettungsweges beträgt $b_{Weg} = 1,2$ m. Die Breite des Tunnels ohne die Kammer beträgt an den engsten Stellen $b_{Tunnel} = 6,0$ m. Da der Tunnel sowohl in Längs- als auch in Querrichtung geneigt ist, das Lichtraumprofil für den Zugverkehr jedoch eingehalten werden muss, verändert sich die Breite zwischen Tunnelaußenwand und Kammerabtrennung.

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.

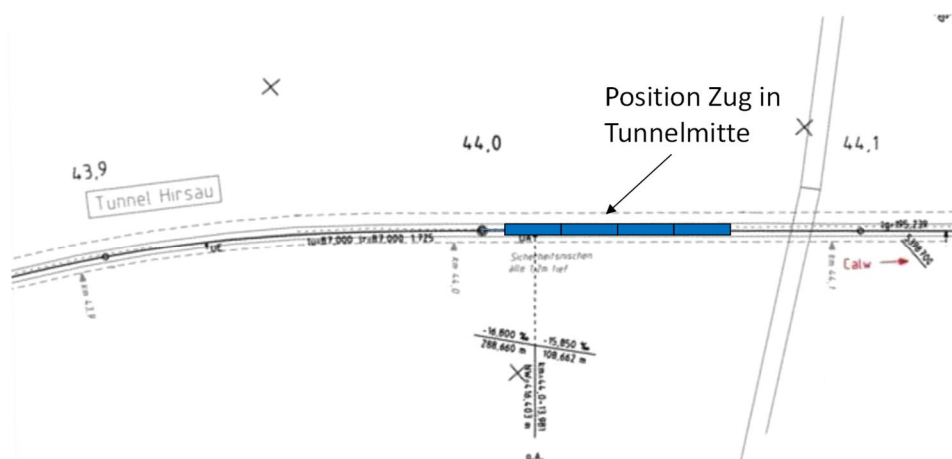


Abbildung 6: Positionierung des Zugs in Mitte des Tunnels Hirsau (Ausschnitt aus Lageplan 16)

Die vorhandene Längsneigung im Tunnel ist nicht mit einer Steigung von Treppenanlagen zu vergleichen. Für die Berechnung der Bewegungszeiten werden daher weiterhin die Werte für horizontale Wege von Predtečenskij und Milinskij angesetzt.

4.3.2 Berechnung der Entfluchtungszeiten für den Tunnel Hirsau

Im Folgenden werden wiederum vier unterschiedliche Varianten von möglichen Verhaltensweisen der fliehenden Personen betrachtet.

Variante 1:

Es wird angenommen, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, aber während der gesamten Strecke durch den Tunnel auf dem gekennzeichneten Rettungsweg verbleiben und das Gleisbett nicht betreten.

Pro Richtung fliehen somit Personen aus 6 Türen und die Gesamtverzögerungszeit ergibt sich pro Richtung zu:

$$\tau_{\text{Ges}} = 6 \cdot 1 \text{ min} = 6 \text{ min}$$

Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich zu:

$$t_{\text{Zugende}} = \frac{l_{\text{Zug}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$t_{25\text{m}} = \frac{l_{\text{Zug}} / 2 + 25 \text{ m}}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m} / 2 + 25 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 11 \text{ min}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$t_{\text{Evak,Ges}} = \frac{l_{\text{Tunnel}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{753 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 42 \text{ min}$$

Variante 2:

Es wird angenommen, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen, aber während der gesamten Strecke durch den Tunnel auf dem gekennzeichneten Rettungsweg verbleiben und das Gleisbett nicht betreten.

Die Gesamtverzögerungszeit muss daher die Personen aus allen 12 Türen berücksichtigen und ergibt sich somit zu:

$$\tau_{\text{Ges}} = 12 \cdot 1 \text{ min} = 12 \text{ min}$$

Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich zu:

$$t_{\text{Zugende}} = \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$t_{25\text{m}} = \frac{l_{\text{Zug}} + 25 \text{ m}}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m} + 25 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 20 \text{ min}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$t_{\text{Evak,Ges}} = \frac{l_{\text{Tunnel}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{753 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 48 \text{ min}$$

Variante 3:

Es wird angenommen, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, jedoch, sobald dies möglich ist (nach Verlassen des Bereichs des Zuges), die volle Breite des Tunnels (ohne Kammer) zur Flucht verwenden, also auch das Gleisbett benutzen.

Die Gesamtverzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug ergibt sich Analog zu Variante 1 zu:

$$\tau_{\text{Ges}} = 6 \cdot 1 \text{ min} = 6 \text{ min}$$

Da im Tunnel eine größere Breite ($b_{\text{Tunnel}} = 6,0 \text{ m}$) und damit größere Fläche zur Verfügung steht, verändert sich die Bewegungsintensität zu:

$$q_{\text{Tunnel}} = q_{\text{Weg}} \cdot \frac{b_{\text{Weg}}}{b_{\text{Tunnel}}} = 9,68 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot \frac{1,2 \text{ m}}{6,0 \text{ m}} = 1,94 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Für die Bewegung innerhalb des Tunnels ergibt sich somit¹⁴:

$$D_{\text{Tunnel}} \approx 0,03$$

$$v_{\text{Tunnel}} = 75,25 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Im Bereich des Zuges ist weiterhin nur der Rettungsweg nutzbar. Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich analog zu Variante 1 somit zu:

$$t_{\text{Zugende}} = \frac{l_{\text{Zug}} / 2}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min}$$

¹⁴ vgl. W. M. Predtečenskij, A.I. Milinskij, 1971: Anhang 1: Tabelle Horizontale Wege, Gefahrenbedingungen

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$t_{25m} = \frac{l_{Zug} / 2}{v_{Weg}} + \frac{25 \text{ m}}{v_{Tunnel}} + \tau_{Ges}$$
$$= \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{25 \text{ m}}{75,25 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 9 \text{ min}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$t_{Evak,Ges} = \frac{l_{Zug} / 2}{v_{Weg}} + \frac{(l_{Tunnel} - l_{Zug}) / 2}{v_{Tunnel}} + \tau_{Ges}$$
$$= \frac{60 \text{ m} / 2}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{(753 \text{ m} - 60 \text{ m}) / 2}{75,25 \text{ m/min}} + 6 \text{ min} = 14 \text{ min}$$

Variante 4:

Es wird angenommen, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen, jedoch sobald dies möglich ist (nach Verlassen des Bereichs des Zuges) die volle Breite des Tunnels (ohne Kammer) zur Flucht verwenden, also auch das Gleisbett benutzen.

Die Gesamtverzögerung durch den Ausstieg aus dem Zug ergibt sich Analog zu Variante 2 zu:

$$\tau_{Ges} = 12 \cdot 1 \text{ min} = 12 \text{ min}$$

Für die Bewegung innerhalb des Tunnels ergibt sich analog zu Variante 3:

$$v_{Tunnel} = 75,25 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Im Bereich des Zuges ist weiterhin nur der Rettungsweg nutzbar. Die Zeit, bei der alle Personen den Bereich des Zuges verlassen haben, ergibt sich analog zu Variante 2 somit zu:

$$t_{\text{Zugende}} = \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \tau_{\text{Ges}} = \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min}$$

Die Zeit, in der alle Personen etwa 25 m Entfernung von Zug zurückgelegt haben, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{25\text{m}} &= \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \frac{25 \text{ m}}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{25 \text{ m}}{75,25 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 18 \text{ min} \end{aligned}$$

Die Gesamtzeit, bis alle Personen den Tunnel verlassen haben, der Tunnel also evakuiert ist, ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} t_{\text{Evak,Ges}} &= \frac{l_{\text{Zug}}}{v_{\text{Weg}}} + \frac{(l_{\text{Tunnel}} - l_{\text{Zug}}) / 2}{v_{\text{Tunnel}}} + \tau_{\text{Ges}} \\ &= \frac{60 \text{ m}}{10,52 \text{ m/min}} + \frac{(753 \text{ m} - 60 \text{ m}) / 2}{75,25 \text{ m/min}} + 12 \text{ min} = 20 \text{ min} \end{aligned}$$

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Entfluchtungszeiten für den Tunnel Hirsau zusammengestellt.

Variante	$t_{Zugende}$	t_{25m}	$t_{Evak, Ges}$
Variante 1: Flucht in beide Richtungen es wird nur der Rettungsweg genutzt	9 min	11 min	42 min
Variante 2: Flucht in eine Richtung es wird nur der Rettungsweg genutzt	18 min	20 min	48 min
Variante 3: Flucht in beide Richtungen es wird der gesamte Tunnelquerschnitt genutzt	9 min	9 min	14 min
Variante 4: Flucht in eine Richtung es wird der gesamte Tunnelquerschnitt genutzt	18 min	18 min	20 min

Tabelle 5: Zusammenstellung Entfluchtungszeiten Tunnel Hirsau

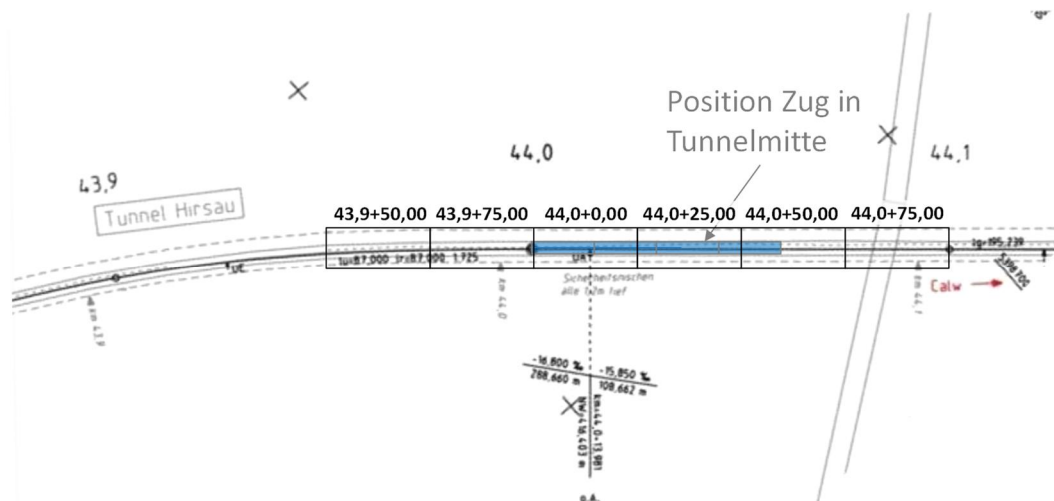
4.3.3 Vergleich mit den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation

In der Feuer- und Rauchgassimulation wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber der Bemessungsbrand für einen S-Bahn-Brand angesetzt. Das Hauptaugenmerk bei der Simulation galt der Temperaturentwicklung an den Wandelementen der abgetrennten Kammer.

Als kritische Temperatur wurde von Seiten des Fachplaners DR. SPANG Ingenieurgesellschaft mbH $T_{crit} = 350 \text{ °C}$ angegeben¹⁵. Diese Temperatur wurde von Seiten des Fachplaners durch eine Heißbemessung ermittelt. Ab dieser Temperatur kann nicht mehr sichergestellt werden, dass die Sandwich-Paneele der Kammerabtrennung in ihrer Position verbleiben. Beim Überschreiten dieser Temperatur besteht somit die Gefahr, dass flüchtende Personen von herabfallenden Paneelen verletzt werden.

¹⁵ mündliche Mitteilung durch Herrn Esslinger, DR. SPANG Ingenieurgesellschaft mbH, im Rahmen der Telefonkonferenz am 06.12.2018

Im Rahmen der Simulation wurden die Temperaturen der Paneele im Bereich des Zuges sowie in ausreichender Entfernung ausgegeben, siehe Abbildung 7.



Die Temperaturen wurden jeweils für den senkrechten Wandbereich (unten), den mittleren, schrägen Bereich (mitte) sowie den oberen Wandbereich (oben) getrennt ausgewertet. In Abbildung 8 (Seite 38) sind die entsprechenden Temperaturkurven dargestellt. Die gestrichelt dargestellten Kurven stammen aus der Simulation mit Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung (Längsströmung in Richtung des Tunnels). Hier steigen die Temperaturen zunächst schneller an, da durch die zusätzliche Luftzufuhr des Windes der Verbrennungsprozess aufgrund des zusätzlichen Sauerstoffs beschleunigt wird.

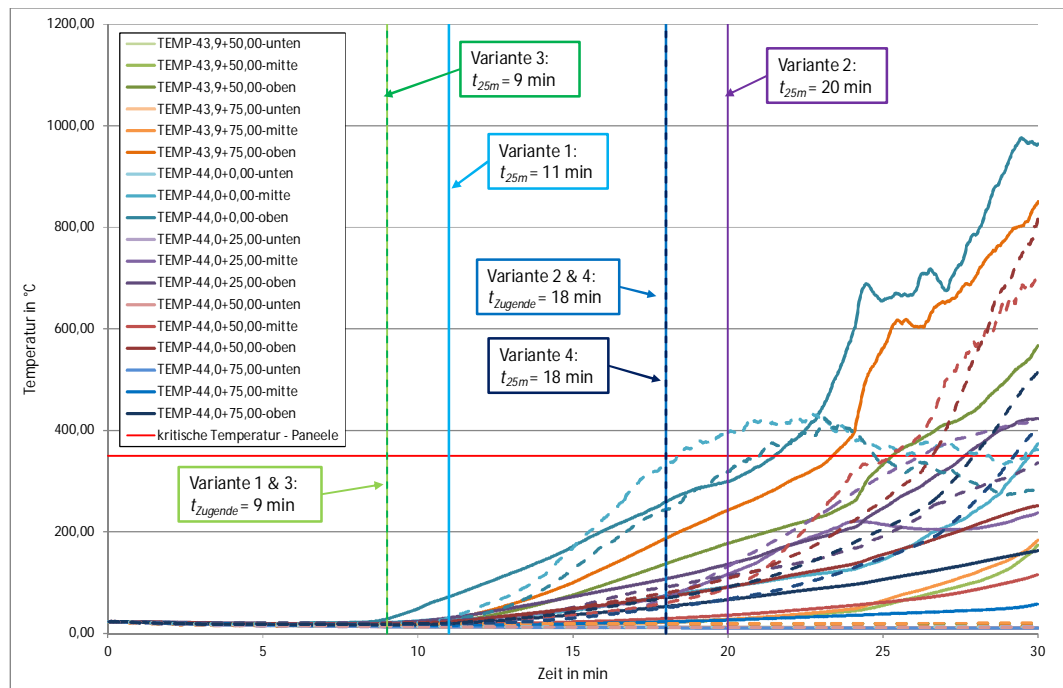


Abbildung 8: Temperaturen an den Wandpaneelen über die Zeit mit Angabe der verschiedenen Entfluchtungszeiten und der kritischen Temperatur

Aus Abbildung 8 wird ersichtlich, dass die kritische Temperatur im Bereich des Zuges ohne Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung im Bereich des Zuges nach ca. 22 min erreicht wird. Dies betrifft die Paneele im oberen Bereich (Decke). Unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Windbeanspruchung (Beaufort 6 – starker Wind¹⁶) wird die kritische Temperatur bereits nach ca. 19 min erreicht.

Bei den Varianten 1 und 3 liegen die Entfluchtungszeiten für den Bereich des Zuges bzw. in einer Entfernung von ca. 25 m vom Zug unter der Zeitdauer, in der die kritische Temperatur erreicht wird. Für die Varianten 2 und 4 trifft dies nur im Vergleich mit den Werten aus der Simulation ohne Windbeanspruchung zu. Unter Berücksichtigung der Windbeanspruchung liegen die Entfluchtungszeiten nach Erreichen der kritischen Temperatur in

¹⁶ siehe Fußnote 13, S. 27

den Wandpaneelen im mittleren und oberen Bereich der Abtrennung in Abschnitt 44,0+0,00.

4.3.4 Bewertung der Situation im Tunnel Hirsau

Analog zum Tunnel Forst wurden vier unterschiedliche von eventuellen Verhaltensweisen der Personen während der Entfluchtung betrachtet. Die berechneten Entfluchtungszeiten geben den Zeitpunkt an, an dem die letzte Person die jeweilige Strecke zurückgelegt hat.

Bei den Varianten 1 und 3, bei denen angenommen wurde, dass die Personen in beide Richtungen fliehen, liegen die Entfluchtungszeiten der Personen für den unmittelbaren Bereich unterhalb der Zeit in der die kritische Temperatur in den Wandpaneelen erreicht wird.

Bei den Varianten 2 und 4 liegen die berechneten Entfluchtungszeiten im Bereich nach Erreichen der kritischen Temperatur im Abschnitt 44,0+0,00. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Variante 2 und 4 davon ausgegangen wird, dass die Personen nur in eine Richtung fliehen. Die Temperatur steigt im Abschnitt 44,0+0,00 schneller an, da dort – in Wagen 1 und Wagen 2 – das Brandereignis verortet ist. Die Annahme der Flucht der Personen in nur eine Richtung beinhaltet die Annahme, dass die Personen entgegengesetzt zum Brandereignis flüchten. Und somit diesen Abschnitt bereits verlassen haben, wenn die Wandpaneele die kritische Temperatur erreichen. Die Annahme beinhaltet jedoch auch, dass die Personen in diesem Fall entgegen der Windrichtung fliehen. Eine Flucht in Windrichtung, bei einer Verortung des Brandes in einem anderen Teil des Zuges, wurde nicht untersucht.

Wie bereits erwähnt, geben die Entfluchtungszeiten jeweils an, wann die letzte Person einen bestimmten Standort erreicht bzw. durchschritten hat. Es ist daher in Bezug auf die kritische Temperatur der Wandpaneele nicht von Belang, dass die Zeitdauer bis alle Personen den Tunnel vollständig

verlassen haben, für die betrachteten Varianten 1 und 2 weit nach Erreichen der kritischen Temperatur im direkten Umfeld des Zuges liegt. Die Personen haben diesen Bereich der Brandumgebung schon verlassen, bis dort die kritische Temperatur erreicht wird.

Für den Tunnel Hirsau ist damit nachgewiesen, dass für flüchtende Personen keine Gefahr durch herabfallende Teile der Kammerverkleidung besteht.

5 Zusammenfassung

Ziel der hier vorliegenden Entfluchtungszeitenberechnung ist es nachzuweisen, dass durch die geplante „Kammerlösung“ zur Abtrennung eines Tunnelbereichs für Fledermäuse aus der Bauweise für diese besondere Anforderung keine zusätzliche Gefahr für flüchtende Personen im Brandfall besteht. Die geplante Konstruktion beinhaltet Wandpaneele in Form von Sandwichelementen, welche gemäß Heißbemessung bei 350 °C ihre kritische Temperatur erreichen, einer Temperatur bei der die Befestigungen der Paneele zu versagen beginnen.

Für beide betrachteten Tunnel – Tunnel Forst und Tunnel Hirsau – wurden jeweils vier unterschiedliche Varianten von möglichen Verhaltensweisen von Personen bei der Flucht betrachtet. Die ermittelten Entfluchtungszeiten wurden den Ergebnissen der Feuer- und Rauchgassimulation gegenübergestellt.

Die kritische Temperatur kann in einzelnen Abschnitten erreicht werden, bevor alle Personen den Tunnel verlassen haben. Jedoch haben die Personen diese Abschnitte dann bereits verlassen.

Für beide Tunnel konnte nachgewiesen werden, dass keine zusätzliche Gefahr für flüchtende Personen durch Herabfallen von Wandpaneelen besteht.

6 Ausfertigung

Für diese Entfluchtungszeitenberechnung beanspruchen wir den gesetzlichen Urheberschutz. Vervielfältigungen sind nur ungekürzt und/oder mit unserer Zustimmung zulässig. Diese Entfluchtungszeitenberechnung darf nur für Zwecke verwendet werden, die mit dem Brandschutz der o.g. Objekte zusammenhängen.

Bad Homburg vor der Höhe, 30.06.2022
Endreß Ingenieurgesellschaft mbH
Brandschutzsachverständige

erstellt:

Dipl.-Ing. Tobias Endreß
Geschäftsführer

i.V. Dr.-Ing. Anne Kawohl
Leiterin Ingenieurmethoden
Fachplanerin Brandschutz IngKH

QS:

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