

TECHNISCHE MITTEILUNG

Datum 16.7.2014

5.1-49

Nachrichtlich

Thema **Sicherheit im Eisenbahntunnel – Risikoanalyse von Notfallszenarien, Abschlussbericht**
Bereich **Sicherheit**
ATR-Nr. **RAT73-JRS-142**
TN-Nr. **RAT 6729-321-3D**
An: **Johnny Restrup-Sørensen**
Von: **Jørn Treldal**
Verteiler: **LBI, EHP, PTR, DAED, DCKK, SKP, OPJ, BIE**

Ramboll-Arup-TEC JV
c/o Rambøll Danmark A/S
Hannemanns Allé 53
DK-2300 Kopenhagen S
Dänemark

Tel.: +45 5161
1000
Fax: +45 5161
1001
www.ramboll.com

1. Zweck der Technischen Mitteilung	2
2. Einleitung	2
3. Normalbetrieb (gemäß dem gegenwärtigen Fahrplan)	3
4. Rückholung von Zügen aus dem Tunnel	5
4.1 Typen des rollenden Materials	5
4.2 Festlegung der Rückholursache	6
4.3 Vorschlag zur Rückholung von Zügen	6
4.4 Bei der Rückholung zu beachtende Vorschriften und Sicherheitsaspekte	8
5. Wiederherstellen des normalen Zugbetriebs nach einer Störung	8
6. Unfälle mit Zugbränden	9
6.1 Risiko	9
6.2 Vorbeugung	11
6.3 Güterzugbrand	11
6.4 Personenzugbrand - Ausstieg der Fahrgäste	12
6.5 Intervention durch Rettungsdienste	47
7. Literaturverweise	47

Erstellt von TK/MH/JTR
Geprüft von NT/PJ/MT
Genehmigt von SKP

Anlage 1: Verkehrsleitzentrale (TTCC): Grundsätzlicher Verfahrensablauf für Notfälle im Eisenbahntunnel

1. Zweck der Technischen Mitteilung

Diese Technische Mitteilung soll einen Überblick über den Tunnel betreffende Aspekte der Eisenbahnsicherheit für die Feste Fehmarnbeltquerung geben.

Der Projektentwurf enthält eine alternative technische Lösung für den ausgewiesenen sicheren Bereich in Übereinstimmung mit der TSI SRT [1]. Die TSI SRT erlaubt die Nutzung einer alternativen technischen Lösung für die Bereitstellung eines sicheren Bereiches, wenn ein mindestens gleichwertiges Sicherheitsniveau für Fahrgäste und Zugpersonal nachgewiesen wird; der Nachweis der Gleichwertigkeit ist anhand der gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken [2] zu erbringen. Die alternative technische Lösung zur Bereitstellung eines sicheren Bereichs für die Eisenbahninfrastruktur der festen Querung muss von der zuständigen nationalen Behörde genehmigt werden.

Gemäß CSM-RA sind die Ziele einer expliziten Risikoanalyse zu beachten, um einen angemessenen Nachweis für die anschließende Sicherheitsbewertung zu erhalten. Wenn identifizierte Gefährdungen durch eine explizite Risikobewertung kontrolliert werden, müssen aus der Risikoanalyse die folgenden Nachweise vorliegen:

- 1) Beschreibung und Begründung (einschl. Begrenzungen) von Analyseverfahren und Analysewerkzeugen (qualitative, quantitative, halbquantitative, Nichtregressionsanalyse usw.)
- 2) Hinweise auf bestehende Sicherheitsmaßnahmen und Risikobegrenzungsfaktoren für jede Gefährdung
 - a. Abschätzung der Folgen der Gefährdung mit Begründung (einschließlich Annahmen und Bedingungen)
 - b. Abschätzung der Häufigkeit der Gefährdung mit Begründung (einschließlich Annahmen und Bedingungen)
 - c. Einstufung der Gefährdungen gemäß ihres Schweregrads und der Häufigkeit des Auftretens
- 3) Angabe zusätzlicher angemessener Sicherheitsmaßnahmen für jede Gefährdung, die zu akzeptablen Risiken führen (iteratives Verfahren nach der Risikobewertung)

Dieses Dokument ist als Abschlussbericht zu betrachten, in dem die Ergebnisse der durchgeführten Risikoanalyse für den sicheren Bereich festgehalten sind.

2. Einleitung

Der Eisenbahnbetrieb in einem Tunnel unterscheidet sich nur wenig von dem Eisenbahnbetrieb auf einer anderen dänischen Bahnstrecke ähnlicher Länge.

Allerdings muss für bestimmte Aspekte des Betriebs, sowohl unter normalen Bedingungen als auch unter Notfallbedingungen, eine technische Analyse durchgeführt werden, um festzustellen, ob die besonderen Bedingungen innerhalb eines Tunnels die Durchführung alternativer und/oder zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen erfordern, um einen sicheren Bereich für den Zugverkehr einzurichten und dauerhaft zu gewährleisten. Danach ist sicherzustellen, dass die den Sicherheitsanforderungen zugrunde liegenden Analyseergebnisse im Entwurf umgesetzt werden, sodass ein vollständiges Sicherheitskonzept für den Tunnel vorgelegt werden kann, das alle einschlägigen Anforderungen und Vorschriften erfüllt.

Die TSI SRT und die EBA-Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“ [3] (auch TuRiLi genannt und im Folgenden als EBA-Tunnelrichtlinie bezeichnet) sowie anerkannte Regeln der Technik enthalten Sicherheitsanforderungen bzw. -empfehlungen für Eisenbahntunnel. Allerdings ist deren genaue Umsetzung in diesem bestimmten Fall sorgfältig zu prüfen, um sowohl ein hohes Maß an Sicherheit als auch an Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Um nur ein Beispiel zu nennen: Die meisten, wenn nicht alle, Normen und Leitlinien basieren auf der Annahme, dass der Tunnel nur aus einer oder mehreren Eisenbahnröhren an Land besteht. Beim Absenktunnel der festen Fehmarnbeltquerung eröffnet die Infrastruktur mit angrenzender Straßenröhre die Möglichkeit zur Anwendung alternativer Lösungen und spielt somit eine wichtige Rolle bei Flucht- und Rettungsmaßnahmen. Folglich ist dies bei der Entwicklung und Optimierung des Rettungskonzepts zu berücksichtigen.

In den folgenden Abschnitten werden drei verschiedene Szenarien im Tunnel der Festen Fehmarnbeltquerung in der Reihenfolge ihres Schweregrads beschrieben: Normalbetrieb, liegen gebliebener Zug (längeres Anhalten) und Unfälle mit Zugbränden.

3. Normalbetrieb (gemäß dem gegenwärtigen Fahrplan)

Der Entwurf des Tunnels der Festen Fehmarnbeltquerung basiert auf einer von Femern A/S vorgelegten Verkehrsprognose (Memo „How to use traffic data“ (Nutzung von Verkehrsdaten), Entwurf vom 15.11.2011) [4], die wiederum auf der FTC-Prognose basiert, wobei allerdings die Anzahl der Güterzüge der neueren deutschen FTIP-Prognose entnommen ist.

Die Prognose für den Eisenbahnverkehr geht aus der nachfolgenden Tabelle hervor. Der Verkehr ist in Zügen pro Tag in beiden Richtungen angegeben.

Tabelle 3-1:

Zugtyp		2025 Fall B mit fester Querung
Personenzüge		40
Güterzüge		78

Die anstehende neue Version der Betriebsrisikoanalyse [11] wurde auf Grundlage dieser Werte ausgearbeitet.

Tabelle 3-1: zeigt die Anzahl an Zügen pro Tag. Es ist jedoch zweckmäßiger, die maximale Anzahl an Zügen zu schätzen, die sich gleichzeitig in einer Röhre befinden.

Für diese Schätzung wurde ein anderer Ansatz gewählt. Hier basiert die Analyse auf einer Fahrplanstudie für das Jahr 2025, siehe RAV 511-007-1 „Timetable Technical Note“ (technische Mitteilung, Fahrplan) [5]. Mit dieser Studie sollten mögliche Engpässe auf der Bahnstrecke zwischen Køge und Lübeck aufgezeigt werden, weswegen der Fahrplan mit mehr Zügen belastet wurde, als in der Verkehrsprognose vorgesehen. Die Studie unterliegt einer Anzahl von grundlegenden Einschränkungen für den Zugbetrieb auf der Strecke Køge–Lübeck, die für jeden denkbaren Fahrplan gelten. Verglichen mit dem prognostizierten Verkehrsaufkommen führt diese Analyse zu sehr konservativen Ergebnissen.

Die Ergebnisse der Studie waren Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Konfigurationen des Bahnbetriebs, siehe **Tabelle 32**.

Tabelle 32: Wahrscheinlichkeit für Züge in den Eisenbahnröhren

24 Stunden	Im Tunnel (min./Tag)	Im Tunnel (%)
Køge–Lübeck		
3 Züge in Röhre	0	0 %
2 Züge (Güterzug, Güterzug)	24	2 %
2 Züge (Güterzug, Personenzug)	0	0 %
2 Züge (Personenzug, Güterzug)	1	0 %
2 Züge (Personenzug, Personenzug)	0	0 %
1 Zug (Güterzug)	525	36 %
1 Zug (Personenzug)	172	12 %
Zeit mit Zügen in Röhre, insgesamt	1	50 %
Lübeck–Køge		
3 Züge in Röhre	0	0 %
2 Züge (Güterzug, Güterzug)	28	2 %
2 Züge (Güterzug, Personenzug)	16	1 %
2 Züge (Personenzug, Güterzug)	0	0 %
2 Züge (Personenzug, Personenzug)	0	0 %
1 Zug (Güterzug)	474	33 %
1 Zug (Personenzug)	157	11 %
Zeit mit Zügen in Röhre, insgesamt		47 %

Tabelle 32 zeigt, dass gemäß der sehr konservativen Fahrplanstudie sich in der Regel jeweils nur ein Zug – oder gar kein Zug – in einer Röhre befinden wird. Das Szenario mit drei Zügen gleichzeitig in einer Röhre tritt gar nicht auf, das mit zwei Zügen gleichzeitig höchstens 2 % der Zeit.

Es ist anzunehmen, dass der Fahrplan zu 95 % der Zeit eingehalten wird, d. h. nur in 5 % der Zeit werden die in **Tabelle 32** genannten Wahrscheinlichkeiten nicht gelten.

Nach einer Störung des Bahnbetriebs besteht die wichtigste Aufgabe der Verkehrsleitzentrale (*Train Traffic Control Centre* TTCC in Kopenhagen) darin, den Normalbetrieb so schnell wie möglich wiederherzustellen. Dies ist in Abschnitt 5 erörtert.

Wie in Abschnitt 1.1 genauer dargelegt, gelten für den Bahnbetrieb im Tunnel der festen Querung bestimmte Einschränkungen:

- höchstens drei Züge gleichzeitig im Tunnel und
- mindestens ein leerer Blockabschnitt (= ca. 1,8 km) Abstand zwischen den Zügen.

Die Wiederherstellung des Normalbetriebs kann zu geringeren Abständen zwischen Zügen als im Normalbetrieb führen, sodass die Wahrscheinlichkeit von zwei oder mehr Zügen gleichzeitig in einer Röhre im Vergleich zu den in **Tabelle 32** aufgeführten Wahrscheinlichkeiten höher ist. Aber auch in einer solchen Situation gelten die oben genannten Betriebsvorschriften.

So gilt selbst bei Wiederaufnahme des Normalbetriebs nach einer Störung: Nur selten werden sich zwei oder mehr Züge gleichzeitig in einer Tunnelröhre befinden.

4. Rückholung von Zügen aus dem Tunnel

Die Rückholung eines Zuges aus dem Tunnel ist dann erforderlich, wenn ein Zug oder ein Zugteil den Tunnel nicht aus eigener Kraft verlassen kann. Derartige Situationen können bei einer Störung des Normalbetriebs auftreten.

Im nachstehenden Betriebsplan sind folgende Situationen nicht abgedeckt:

- Der Zug kann den Tunnel nach der Behebung der Störung aus eigener Kraft verlassen.
- Rettungsmaßnahmen nach einem Unfall, Brand usw.

Die nachstehend genannten betrieblichen Maßnahmen können jedoch nach beendeter Evakuierung und Brandbekämpfung umgesetzt werden.

Es gilt die Annahme, dass der zurückzuholende Zug bzw. Zugteil auf eigenen Rädern rollen kann. Die vorgeschlagenen Maßnahmen gelten demzufolge nicht für die Rückholung von Zügen nach einem Unfall oder einer Entgleisung. Für diese Fälle werden gesonderte Maßnahmen ausgearbeitet.

4.1 Typen des rollenden Materials

Ausgehend von dem vorläufigen Betriebsplan für die Bahnstrecke gilt die Annahme, dass die feste Querung bei Normalbetrieb von den folgenden Zügen und dem folgenden rollenden Material genutzt wird. Das Betriebskonzept wird dann auf diese Zugtypen beschränkt.

Personenzüge (alle gemäß Kategorie B nach TSI):

- a. Intercity-Züge:

Neues elektrisches rollendes Material ähnlich der deutschen ICE-Klasse. E-Triebwagenzüge mit Wagen, verbunden durch automatische oder Schraubenkupplung. Automatische Kupplungen an den Zugenden.

- b. Regionalzüge:
E-Triebwagenzüge mit Wagen ähnlich dem Typ, der auf der Öresundquerung zwischen Dänemark und Schweden verwendet wird (Grundlage: Bombardier Regina). Wagen durch automatische oder Schraubenkupplung verbunden. Automatische Kupplungen an den Zugenden.
E-Lokomotiven und Steuerwagen am anderen Ende. Alle Kupplungen mit Standardpuffern und Zugeinrichtungen.
- c. Andere Personenzüge:
E-Lokomotiven und Wagen. Kein Steuerwagen am Ende. Alle Kupplungen mit Standardpuffern und Zugeinrichtungen.
Diese Konfiguration ist für internationale Nachtzüge typisch.

Güterzüge:

- a. Von E-Lokomotiven mit Einfach- oder Mehrfachtraktion gezogene Güterzüge. Alle Kupplungen mit Standardpuffern und Zugeinrichtungen. Lokomotiven ähnlich der DB-Baureihe 185 oder EG.

4.2 Festlegung der Rückholursache

Eine Rückholursache ist jede Zugstörung, die ein Verlassen des Tunnels aus eigener Kraft verhindert.

- Ein Zug hat keine ausreichende Traktion, um die Steigung aus dem Tunnel zu bewältigen. Mögliche Ursachen:
 - a. Überlastung der Bahnstromversorgung mit anschließendem Abfall der Fahrleitungsspannung und damit der Zugkraft von Triebfahrzeugen.
 - b. Abfall der Traktionskraft aufgrund des Abschaltens von defekten Triebfahrzeugen.
- Ein Zug muss im Tunnel aufgrund eines Defekts anhalten, wodurch die Weiterfahrt des gesamten Zugs oder eines Teils des Zugs verhindert wird.

4.3 Vorschlag zur Rückholung von Zügen

Der Ansatz für die Rückholung eines Zuges hängt vom jeweiligen Zugtyp und der Rückholursache ab. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten zum Abschleppen von Zügen. Diese sind in Abschnitt 4.3.1 und 4.3.2 erklärt.

4.3.1 *Rückholung des liegen gebliebenen Zuges mithilfe des nachfolgenden Zuges*

Das schnellste und einfachste Verfahren, einen liegen gebliebenen Zug aus dem Tunnel zu manövrieren, besteht darin, dass der nachfolgende Zug diesen schiebt. Dieses Verfahren ist insbesondere bei Personenzügen weit verbreitet.

Dieses Verfahren eignet sich in folgenden Fällen:

- Beide Züge sind E-Triebwagenzüge von mehr oder weniger demselben Typ oder mit demselben Kupplungstyp.
- Beide Züge werden von Lokomotiven gezogen.

Handelt es sich bei dem liegen gebliebenen Zug um einen Güterzug, reicht die Zugkraft des nachfolgenden Zuges in den meisten Fällen für eine Rückholung nicht aus.

Vorgeschlagenes Rückholverfahren:

Der nachfolgende Zug hält am nächsten möglichen Blocksignal (ETCS-Blockkennungstafel). Der Stellwerkswärter in der Verkehrsleitzentrale informiert beide Zugführer über die notwendige Kupplung. Sobald die Zugführer informiert sind, richtet der Stellwerkswärter ein besetztes Gleis ein, sodass der herannahende Zug auf den vom liegen gebliebenen Zug besetzten Gleisabschnitt fahren kann. Der Zugführer des zweiten Zuges bestätigt den Übergang zum Modus ETCS OS (*On Sight*; dt. auf Sicht) und nähert sich dem liegen gebliebenen Zug mit einer Höchstgeschwindigkeit von 40 km/h unter Berücksichtigung aller Vorschriften für eine Fahrt auf Sicht. Nach dem Ankuppeln des liegen gebliebenen Zuges kann dieser bis zum nächsten Nebengleis (in der Regel ein Ausweichgleis) geschoben werden. Die Ausweichgleise in der Nähe des Tunnels befinden sich bei den Bahnhöfen Lolland Süd und Burg, jeweils etwa 5 km vom Portal entfernt.

Ist dieses Verfahren ungeeignet, sollte das nachstehend in 4.3.2 skizzierte Verfahren verwendet werden.

4.3.2 *Abschleppen des liegen gebliebenen Zuges aus dem Tunnel*

Bei diesem Verfahren muss sich ein anderes Triebfahrzeug dem liegen gebliebenen Zug von vorne nähern, um diesen aus dem Tunnel zu schleppen.

Normalerweise steht ein solches Triebfahrzeug, in der Regel eine E- oder Diesellokomotive, nicht in Tunnelnähe zur Verfügung, sondern muss erst vom nächsten Betriebshof, wahrscheinlich Lübeck oder Nykøbing Falster, oder sogar Kopenhagen, anfahren. Es ist unwahrscheinlich, dass die Eisenbahnverkehrs- oder -infrastrukturunternehmen die Kosten für die Bereithaltung einer Lokomotive mit Führer an jedem Tunnelende für derartige Maßnahmen akzeptieren.

In einigen Fällen lässt sich möglicherweise die Lokomotive eines Güter- oder Personenzuges verwenden, um so Verspätungen zu beschränken.

Vorgeschlagenes Rückholverfahren:

Die Lokomotive fährt auf dem normalen Gleis zum Tunnel und kreuzt am fraglichen Tunnelportal im normalen ETCS-Modus FS MA, d. h. unter voller Überwachung, auf das Gleis des liegen gebliebenen Zuges. Das Annäherungs- und Kupplungsverfahren ist identisch mit dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Verfahren.

Nach dem Ankuppeln schleppt die Lokomotive den liegen gebliebenen Zug zum nächsten Nebengleis oder weiter zu einem Bahnbetriebswerk.

Das Verfahren kann zum Abschleppen in beide Richtungen verwendet werden. Es gelten die ETCS-Streckeneinstellungen. Ein Rückwärtsabschleppen wird jedoch häufig dadurch verhindert, dass hinter dem liegen gebliebenen Zug mehrere Züge warten.

4.4 Bei der Rückholung zu beachtende Vorschriften und Sicherheitsaspekte

In Dänemark wird gerade das gesamte Signalsystem durch das Europäische Eisenbahnverkehrsleitsystem ERTMS ersetzt, zu dem auch das Zugleit- und Sicherungssystem ETCS Level 2 gehört. Die Installation des neuen Systems im Tunnel der festen Fehmarnbeltquerung sowie an den deutschen (Fehmarn) und dänischen Hinterlandanbindungen wird bis zur Eröffnung des Tunnels abgeschlossen sein.

Der Verkehr im Tunnel und auf den Zufahrtsgleisen wird über die Verkehrsleitzentrale gesteuert. Somit ist anzunehmen, dass die Verkehrsleitung bis zum Übergabepunkt des Systems, der Hinterlandanbindung auf Fehmarn, dänischen Rechts- und Betriebsvorschriften unterliegt.

Die vorstehend beschriebenen Verfahren weichen nicht von Verfahren für ähnliche Situationen auf einer offenen Bahnstrecke ab. Spezifisch für den Tunnel ist jedoch, dass der Rückstau wartender Züge hinter dem liegen gebliebenen Zug gesteuert wird, um zu verhindern, dass Personenzüge über längere Zeit in einer Tunnelröhre stecken bleiben.

Das ETCS-System Level 2 wird eine unbedingte Notbremsfunktion enthalten, die von der Verkehrsleitzentrale für einen bestimmten Bereich oder einen bestimmten Zug aktiviert werden kann. Über diese Funktion wird jeder fragliche Zug zwangsgebremst (Notbremse). Mit dieser Funktion ist sichergestellt, dass nur solche Züge hinter einem liegen gebliebenen Zug stecken bleiben, die sich bereits in der betroffenen Röhre befinden oder deren Abstand zum Portal geringer ist als der Bremsabstand. Falls die Dauer des unplanmäßigen Halts gemäß vordefinierter Bedingungen als zu lang eingeschätzt wird, kann das in Abschnitt 1.1 beschriebene Rückwärtsfahren eingeleitet werden.

Eine genaue Beschreibung der ETCS-Funktionen in anomalen Situationen ist Abschnitt 1.1 zu entnehmen.

5. Wiederherstellen des normalen Zugbetriebs nach einer Störung

Eine Störung des Zugbetriebs, z. B. ein liegen gebliebener Zug, führt zu einem Rückstau von Zügen auf der Strecke hinter der Störung. Diese Züge werden in der Verkehrsleitzentrale normalerweise in der folgenden Reihenfolge behandelt:

- Personenzüge im Fernverkehr (IC-Züge)
- Personenzüge im Regionalverkehr (RE-Züge)
- Güterzüge

Die Verkehrsleitzentrale ist bestrebt, den fahrplanmäßigen Betrieb so schnell wie möglich wiederherzustellen. Aufgrund des Geschwindigkeitsunterschieds zwischen Güterzügen und Personenzügen und der vorstehenden Reihenfolge werden Güterzüge, wenn möglich, zu

einem Ausweichgleis geführt, um Personenzügen freie Fahrt zu gewähren. RE-Züge fahren mit derselben Geschwindigkeit wie IC-Züge, werden dann aber in der Regel von Letzteren an Bahnhöfen überholt, wo sie planmäßig anhalten.

Die Ausweichgleise in der Nähe des Tunnels befinden sich bei den Bahnhöfen Lolland Süd und Burg, jeweils etwa 5 km vom Portal entfernt, sowie Lolland Mitte und Großenbrode, 12–18 km von den Portalen entfernt. In Anbetracht dieser Abstände wird ein auf dem Ausweichgleis wartender Güterzug wohl kaum das Tunnelportal erreichen, ehe ein überholender Personenzug mit normaler Geschwindigkeit den Tunnelausgang erreicht hat.

Es ist jedoch wahrscheinlich, dass ein von einem IC-Zug überholter RE-Zug in den Tunnel einfährt, ehe der IC-Zug vor ihm die Röhre verlassen hat.

Demzufolge kann die Wiederherstellung des Normalbetriebs nach einer Störung dazu führen, dass sich häufiger zwei Personenzüge gleichzeitig in einer Röhre befinden; die Kombination Personenzug gefolgt von einem Güterzug hingegen ist sehr unwahrscheinlich.

Die Verkehrsleitzentrale kann auch entscheiden, dass der Güterzug erst auf dem Ausweichgleis nach dem Tunnel überholt wird, wenn der Abstand zwischen den Zügen vor dem Tunnel dies verlangt. In diesem Fall befindet sich der Güterzug wahrscheinlich nahe dem Tunnelausgang, während der überholende Personenzug gerade in den Tunnel einfährt. Diese Situation tritt auch in dem normalen vorläufigen Fahrplan auf, siehe Abschnitt 3.

6. Unfälle mit Zugbränden

6.1 Risiko

In der Betriebsrisikoanalyse (Operational Risk Analysis, ORA) [11] für den Tunnel der Festen Fehmarnbeltquerung wird das Risiko in der Anzahl der Todesfälle und gewichteten schweren Verletzungen pro Jahr für eine Liste unterschiedlicher Sicherheitsziele gemessen, z. B. das Risiko für Fahrgäste und dem Risiko für Mitarbeiter der Betreibergesellschaft. Das Ziel ist ein Risiko, das nicht größer ist als die Genehmigungskriterien, die auf Grundlage der nationalen Referenzwerte (NRV) gemäß 2012/226/EU festgelegt werden. Folglich wird für alle definierten Sicherheitsziele mittels Risikoanalyse im Rahmen des aktuellen Designs für die Baugenehmigung dokumentiert, dass das Risiko als annehmbar betrachtet wird.

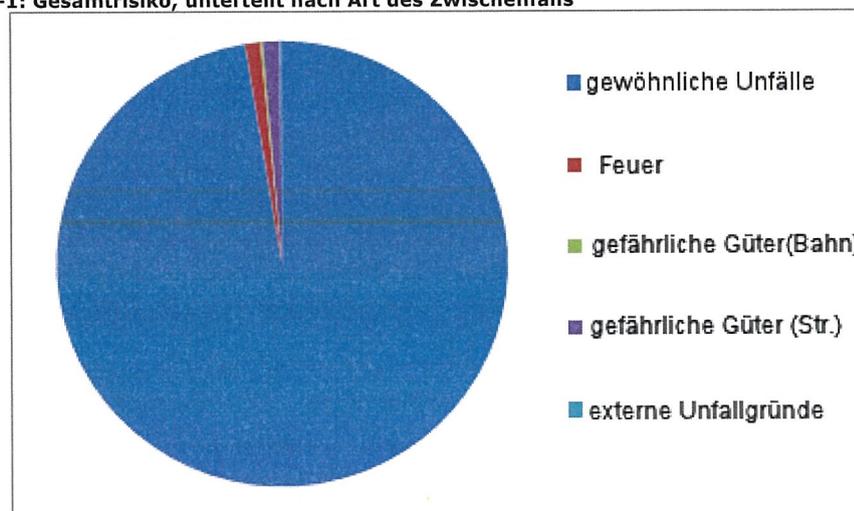
Die für die Betriebsrisikoanalyse verwendete Methode stimmt mit den in der CSM-Verordnung genannten Grundsätzen überein. Die Gestaltung der festen Querung ist risikobasiert und nicht vorschreibend – deshalb wurde für die Betriebsrisikoanalyse die Variante der expliziten Risikoabschätzung für die kombinierte Schienen- und Straßenanlage angewendet.

Das übergeordnete Risikobild für die Eisenbahn (Fahrgäste) unter Verwendung von Daten aus der Betriebsrisikoanalyse ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Tabelle 6-1:

Art der Störung	Todesfälle/Jahr	Anteil am Gesamtrisiko in %	Wiederkehrzeit in Jahren
Normale Bahnunfälle	$1,74 \cdot 10^{-3}$	93,72 %	575
Brand	$3,69 \cdot 10^{-5}$	1,99 %	27000
Gefahrgut – Bahn	$7,05 \cdot 10^{-7}$	0,04 %	918000
Gefahrgut – Straße	$7,51 \cdot 10^{-5}$	4,04 %	13500
Externe Störungen	$4,01 \cdot 10^{-6}$	0,22 %	250000
Gesamt	$1,86 \cdot 10^{-3}$	100 %	

Abbildung 6-1: Gesamtrisiko, unterteilt nach Art des Zwischenfalls



In der Tabelle sind mit „gewöhnlichen Bahnunfällen“ Unfälle wie Kollisionen und Entgleisungen gemeint. Es ist ersichtlich, dass diese Art von Unfällen den Großteil des Risikos ausmacht, wobei die Wiederkehrzeit immer noch bei über 500 Jahren liegt.

Es sei hier angemerkt, dass sich der Risikoanteil von Gefahrgütern auf Explosionsunfälle bezieht, die ernsthafte Schäden am Tunnelbauwerk hervorrufen. Für diese Szenarien ist daher das Vorhandensein eines „sicheren Bereichs“ nicht relevant.

Brände machen etwa 2 % des Risikos aus – bei einer Wiederkehrzeit von knapp 27.000 Jahren (für 1 tödlichen Unfall). Die berücksichtigten Brandarten können verschiedene Ursachen haben: Für den Bahntunnel selbst besteht kaum Brandgefahrpotenzial. Mögliche Brandursachen sind Brandstiftung, technische Probleme, Kollision oder Entgleisung. Jedes dieser Unterszenarien hat einen geringen Anteil am Gesamtrisiko und für alle weiteren Unterszenarien wäre daher der Risikoeinfluss jedes spezifischen Szenarios zu gering, um das Gesamtrisiko zu beeinflussen. Nähere Informationen über Risikoeinflüsse und Grenzbedingungen siehe Betriebsrisikoanalyse.

Das sehr geringe Risiko von Bränden (und anderen ernststen Störungen/Unfällen) stimmt mit den Statistiken überein, die in Industriestaaten in verschiedenen Teilen der Welt erhoben wurden:

- Die Europäische Eisenbahnagentur (ERA) hat in den letzten 25 Jahren keine Todesfälle durch Brände verzeichnet.
- Auf der japanischen Shinkansen-Linie, auf der die Hochgeschwindigkeitszüge eine große Anzahl Tunnel durchfahren, gab es innerhalb von 30 Jahren keinen einzigen Todesfall durch Brand.
- Im Öresundtunnel mit einem sehr viel dichteren Bahnverkehr als der Fehmarnbelttunnel wurden in den 14 Jahren seit Eröffnung der Öresundquerung keine Zugbrände oder Evakuierungen verzeichnet.

6.2 Vorbeugung

Gesetzlichen Bestimmungen zur Sicherheit in Eisenbahntunneln enthalten Mindestanforderungen an Unfallverhütungs- und Überwachungsmaßnahmen, die im Tunnel zu implementieren sind. Außerdem müssen weitere und projektspezifische Sicherheitsanforderungen auf der Grundlage der fortlaufenden Betriebsgefahrenanalyse [12] eingeführt werden. Um also die Wahrscheinlichkeit die Entstehung eines Zugbrandes im Tunnel zu verringern, wurden folgende Sicherheitsanforderungen für den Eisenbahntunnel festgelegt:

- Das Risiko von Entgleisungen ist minimal, da es im Tunnel keine Weichen oder Kreuzungen gibt. Sollte ein Zug entgleisen, fungieren die erhöhten Fluchtwege entlang der Gleise als „Leitplanken“ und verhindern das Umstürzen des entgleisten Zugs.
- Vor den beiden Tunnelportalen wird ein Erkennungssystem für Entgleisungen installiert, das verhindern soll, dass ein bereits (teil)entgleister Zug in den Tunnel einfährt.
- Ein System zur Erkennung heißer Achslager wird vor den Portalen installiert.
- Der Tunnel darf ausschließlich von Zügen der Kategorie B befahren werden, die nach Ausbruch eines Brands mindestens 15 min lang mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h weiterfahren können – eines der Merkmale dieser Kategorie. Das bedeutet, dass ein Zug unabhängig von der Position, auf der er sich bei Ausbruch des Brands im Tunnel befindet, mit allergrößter Wahrscheinlichkeit die Tunnelausfahrt erreichen kann, bevor er anhalten muss.
- Außerhalb der Tunneleinfahrten wird eine Zugangsüberwachung installiert.

6.3 Güterzugbrand

Ein Brand in einem Güterzug betrifft nur eine sehr begrenzte Zahl von Personen (normalerweise nur eine Person), die letztendlich aus dem Zug evakuiert werden müssen.

Nachdem die Leitstelle des Infrastrukturbetreibers LCC den Alarm „Brennender Güterzug“ von der Verkehrsleitzentrale TTCC erhalten hat, besteht das normale Verfahren bei einem Brandszenario darin, eine ausreichende Anzahl Strahlventilatoren in Fahrtrichtung einzuschalten, um die kritische Geschwindigkeit zu gewährleisten. Die kritische

Geschwindigkeit ist definiert als die minimale Durchschnittsgeschwindigkeit des Luftstroms im Tunnel, die einen Raucherückschlag verhindert. So ist gewährleistet, dass der gesamte Rauch vor dem brennenden Zug in Richtung Ausgangsportal geblasen wird und der Tunnelabschnitt vor dem Brandherd rauchfrei bleibt sowie mit Frischluft versorgt wird. Es wird empfohlen, zuerst die hinter dem Brandherd befindlichen Strahlventilatoren einzuschalten, um eine durchgängige Rauchsicht zu erzeugen und die von dem schnellen Luftstrom erzeugten Turbulenzen zu minimieren. Anschließend können andere Strahlventilatoren in schneller Folge eingeschaltet werden, um den erforderlichen Luftstrom zu erzeugen.

Falls Personenzüge hinter dem verunfallten Zug liegen geblieben sind, besteht eine der ersten Notfallmaßnahmen darin, diese Züge rückwärts aus der Röhre zu fahren. Diese Maßnahme wird durch die Funktion ETCS REVERSE ermöglicht. Laut Untersuchungen beginnt das Zurückfahren eines gestoppten Zuges ungefähr 1,5 bis 2 min, nachdem der Zug zum Stehen gekommen ist. Fahrgäste können an Bord bleiben und müssen nicht evakuiert werden, da saubere Frischluft im Zug zirkuliert und der Tunnel an dieser Stelle rauchfrei ist.

Die Richtungsumkehr der Strahlventilatoren ermöglicht die Umkehr des Luftstroms, nachdem der Personenzug den Tunnel verlassen hat; dann können die Strahlventilatoren entsprechend den Anforderungen der Feuerwehr gesteuert werden, um das Feuer zu erreichen und den Rauch einzudämmen.

6.4 Personenzugbrand - Ausstieg der Fahrgäste

6.4.1 Einleitung

Im Gegensatz zu einem Güterzugbrand sind von einem Personenzugbrand in der Regel eine große Anzahl von Personen betroffen, die letztendlich aus dem Zug evakuiert werden müssen. Es sei hier angemerkt, dass eine Evakuierung im Tunnel nur dann eingeleitet wird, wenn alle anderen Optionen fehlschlagen. Grundsätzlich gilt, dass ein brennender Zug bis zum Tunnelausgang weiterfahren soll, damit die Fahrgäste den Zug und den Schienenbereich im Freien verlassen können.

In dem seltenen Fall, bei dem die Weiterfahrt des Zuges bis zum Tunnelausgang nicht möglich ist, wird der auf dem Diagramm in Anlage 1 dargestellte Verfahrensablauf für Notfälle durchgeführt. Dieses grundlegende Verfahren besteht aus fünf Hauptelementen:

1. Alle Züge in der unfallfreien Röhre erhalten eine unbedingte Halteanweisung, um die Geschwindigkeit zunächst zu verringern.
2. Alle Züge, die sich dem Tunnel nähern, werden gestoppt.
3. Die Verkehrsleitzentrale aktiviert einen vordefinierten Verfahrensablauf für Notfälle einschließlich einer entsprechenden Belüftungsstrategie zur Kontrolle der Rauchverteilung.

4. Alle Züge, die hinter dem verunfallten Zug bzw. hinter dem Unfallort in der unfallfreien Röhre festsitzen, müssen aus der Röhre rückwärts herausfahren.
5. Züge vor dem Unfallort setzen die Fahrt aus den Röhren fort.

Das Sicherheitskonzept und die Brandbekämpfungsstrategie für die Bahnröhren wurden so ausgestaltet, dass sie neben anderen Zielen auch die TSI-Anforderungen an die Tunnelsicherheit erfüllen (siehe den Bericht über Sicherheitseinrichtungen RAT 6729-001 [6] und den Bericht über die Brandbekämpfungsstrategie RAT 6724-001 [7]).

Gemäß TSI SRT muss ein sicherer Bereich folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die Bedingungen erlauben das Überleben.
- Der Zugang für Personen ist sowohl mit als auch ohne Hilfe möglich.
- Personen sind zur Selbstrettung in der Lage oder können auf die Rettung durch die Rettungsdienste warten.
- Kommunikation mit der Leitstelle des Infrastrukturbetreibers ist möglich.

Die deutsche EBA-Tunnelrichtlinie gibt weitere Anforderungen vor, die über die in der TSI SRT aufgeführten allgemeinen Anforderungen hinausgehen. Für das in der EBA-Tunnelrichtlinie beschriebene Zweiröhren-Tunnelkonzept wird verlangt, dass Verbindungsstollen (Querschläge) zwischen den Röhren mit Schleusen (rauchdichten Türen) ausgestattet sein müssen, wenn die parallel verlaufende Röhre als sicherer Bereich gelten soll. Die Schleusen müssen eine Mindestlänge von 12 m aufweisen. Zweck der Schleusen ist es, das Eindringen von Rauch aus der vom Unfall betroffenen Tunnelröhre in die benachbarte Röhre zu unterbinden.

Eine zu diesem Zweck durchgeführte technische Untersuchung hat den Nachweis für folgende Sachverhalte in Bezug auf die Tunnelkonstruktion der Festen Fehmarnbeltquerung erbracht:

- Schleusen sind konstruktionsbedingt nicht erforderlich und würden zudem für die Querschläge keine Vorteile bringen.
- Die unfallfreie parallele Straßen- oder Bahnröhre stellen einen sicheren Bereich dar, dessen Sicherheitsniveau den grundsätzlichen Anforderungen sowohl von TSI SRT als auch der EBA-Tunnelrichtlinie entspricht.

Im Folgenden wird diese Studie näher erläutert.

6.4.2 Methodik

Es wurde eine quantifizierte Analyse angewendet, um den Nachweis zu erbringen, dass die unfallfreie Bahn- bzw. Straßenröhre einen sicheren Bereich darstellt und dass bei dem geplanten Tunnelkonzept keine Schleusen benötigt werden. Die übernommene Methodik und Herangehensweise werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Dabei ist zu beachten, dass diese Untersuchung ausschließlich die Bedingungen behandelt, die außerhalb der vom Unfall betroffenen Tunnelröhre herrschen, nicht aber die Bedingungen in der Unfallröhre selbst. Die Gründe dafür werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.4.2.1 Größter anzunehmender Unfall

Eine quantifizierte Analyse verlangt zunächst die Festlegung einer GAU-Situation, um den Tunnelentwurf zu testen.

Bei der Ausarbeitung des Konzepts für die Sicherheitsstrategie bei Bränden für die Bahnrohre (RAT 6724-001) wurde eine qualitative Designüberprüfung vorgenommen, in der über 80 denkbare Zugbrandszenarien identifiziert wurden. Im Verlauf der weitergehenden Prüfung dieser Szenarien wurden 43 Szenarien im Hinblick auf ASET/RSET bewertet, wobei die Zeit für die Evakuierung der Fahrgäste mit der Zeit für die Entwicklung unverträglicher Wärme- und Rauchbedingungen verglichen wurde. Schließlich wurden von den 43 Szenarien insgesamt 10 Szenarien der CFD-Modellversuche für die Hitze- und Rauchausbreitung unterzogen. Damit wurden die Voraussetzungen für die Bereitstellung der Daten für die ASET/RSET-Analyse aller 43 Zugbrandszenarien erfüllt.

Die Analyse zum „sicheren Bereich“ basiert auf den schlimmstmöglichen Brandszenarien für Personenzüge (GAU). Objekt der Sicherheitsanalyse ist ein Personenzug, da die Sicherheit von Personen (Leben und Gesundheit) im Mittelpunkt steht. Es wird von einem Fall ausgegangen, bei dem die maximale Anzahl von Menschen (>99. Perzentil; ein extrem unwahrscheinliches Szenario in Verbindung mit einem Brand) der Brandgefahr ausgesetzt sein könnte.

Diese Szenarien wurden im Rahmen der Überprüfung der Konzeptplanung, welche der Analyse vorausging, untersucht. Anschließend wurde auf dieser Grundlage das plausibelste Szenario ausgewählt:

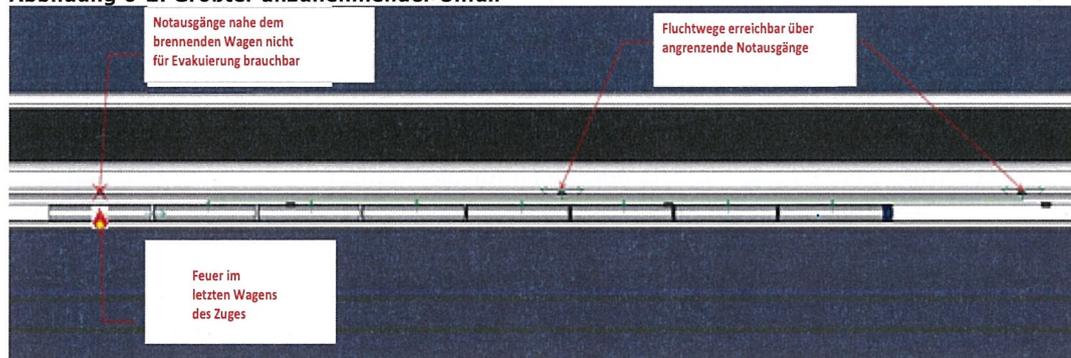
- Ein Zugbrand, bei dem die Höchstanzahl von 588 Personen, d. h. ein voll besetzter Personenzug, betroffen ist. Andere Szenarien gehen von einer geringeren Zugbelegung aus, was eher die Regel sein dürfte (95 bzw. 200 Insassen). Damit wurde von der höchstmöglichen Anzahl der vom Worst-Case-Szenario betroffenen Personen ausgegangen.
- Beim Eintritt dieses Worst-Case-Szenario wurde dann die maximale Anzahl von 38 Todesfällen in der vom Unfall betroffenen Unfallröhre ermittelt.
- Mit 300 s wurde die kürzeste und konservativste ASET (*Available Safe Egress Time*; dt. verfügbare sichere Fluchtzeit) bzw. Zeitspanne bis zu unverträglichen Bedingungen in der Unfallröhre angenommen, was der ursprünglichen Analyse, die Teil der Brandbekämpfungsstrategie war, entspricht.

Die vorliegende quantifizierende Analyse geht ausschließlich von einem Brand in einem Personenzugwagen aus. Der Brand am hinteren Zugende hinderte die Insassen daran, die hintere Tür des letzten Wagens und einen Notausgang bzw. eine aus der Unfallröhre herausführende Verbindungstür zu erreichen. Dieses Szenario ist in **Abbildung 6-2** dargestellt.

Es sollte angemerkt werden, dass diese neuere Untersuchung nicht zum Ziel hatte, die Anzahl der Todesfälle zu bewerten, die aus einem solchen Szenario resultieren können. Eine solche Quantifizierung wurde bereits im Rahmen der Bewertungen von ASET und RSET (*Required Safe Egress Time*; dt. benötigte Fluchtzeit) im Zuge der Ausarbeitung des Berichts über die Sicherheitseinrichtungen und der Brandbekämpfungsstrategie vorgenommen.

Diese Studie zeigt, dass die früheren ASET-Zeiten mit den zuvor erreichten vergleichbar sind. Die ASET-Zeit (unverträgliche Bedingung) beträgt im Bereich des brennenden Wagens ca. 320 s. Die in der Unfallröhre außerhalb dieses Bereichs von etwa 20 m Länge herrschenden Bedingungen werden als verträglich erachtet. Es wurde festgestellt, dass in diesem Bereich des Zuges einige Insassen (38) als Todesfälle einzustufen sind. Wie bereits erwähnt, ist anzunehmen, dass der sichere Bereich für diese Personen keine Verbesserung der Gesamtsituation darstellt, wohl aber für die verbleibenden Fahrgäste, denen die Selbstrettung aus dem Bereich, in dem unverträgliche Bedingungen herrschen, gelingt.

Abbildung 6-2: Größter anzunehmender Unfall



6.4.2.2 Computeranalyse – Übersicht

Im Zuge der Untersuchung wurden zwei Arten von Computeranalysen vorgenommen.

Die erste Art der Analyse basiert auf der numerischen Strömungsmechanik (engl. *computational fluid dynamics*; CFD) und dient der Darstellung der Ausbreitung von Hitze und Rauch des Zugbrands zur Bewertung der verfügbaren Fluchtzeit (ASET). Im Mittelpunkt des Interesses steht dabei nicht die von Brand betroffene Tunnelröhre, sondern die Umweltbedingungen, die außerhalb dieser Röhre herrschen, insbesondere in den parallel verlaufenden Bahn- und Straßenröhren und in den Notausgängen/Querschlägen zwischen den Röhren. Einzelheiten hierzu werden in Abschnitt 6.4.3 beschrieben.

Das zweite Untersuchungsgebiet besteht in einer computergestützten Evakuierungsanalyse, mit der die RSET gemessen wird, die Zeit die Insassen benötigen, um den vorgesehenen sicheren Bereich in der benachbarten Straßentunnelröhre zu erreichen. Dabei wird auch die Zeit, die die Insassen zum Erreichen der benachbarten Bahnöhre benötigen, ohne dort das Gleis zu überschreiten, bewertet. Dabei wird angenommen, dass die evakuierten Personen auf dem östlichen Notgehweg verbleiben, weil die Schienen aus irgendeinem Grund nicht überquert werden können. Auch hier steht nicht die Evakuierungszeit aus dem Zug oder innerhalb der vom Brand betroffenen Tunnelröhre im Mittelpunkt, sondern die Bewegungen außerhalb dieser Röhre.

6.4.3 CFD-Analyse

Die CFD-Analyse der Rauchausbreitung in den Bahntunnelröhren wurde mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) durchgeführt. FDS ist ein CFD-Modell, welches das umfangreiche Turbulenzmodell „Large Eddy Simulation“ (LES) verwendet. FDS wurde am US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology für die Messung von

feuerinduzierten Luft- und Gasströmungen entwickelt. Die Software liefert numerische Lösungen für eine bestimmte Art der Navier-Stokes-Gleichung, die auf langsame, durch Hitze verursachte Strömungen anwendbar ist, wobei das Hauptaugenmerk auf der Übertragung von Rauch und Hitze bei Bränden liegt. Hauptziel in der Entwicklung von FDS ist seit jeher die Lösung praktischer Probleme in der Brandbekämpfungstechnik und zugleich die Bereitstellung eines Instruments zur Erforschung der grundlegenden Dynamik bei Bränden und der Verbrennung.

FDS ist eine weit anerkannte und vielfach angewendete CFD-Lösung. Aufgrund unserer umfangreichen Erfahrung beim Einsatz unterschiedlicher Analyseinstrumente wie Fluent, CFX und Star sind wir zu der Auffassung gelangt, dass die Anwendung von anderen Simulationsprogrammen keine signifikant anderen Ergebnisse erbracht hätte. Die Wahl fiel auf FDS, weil wir es aus den nachfolgenden Gründen als das für diesen Zweck am besten geeignete Analyseinstrument erachten:

- Die FDS-Software wurde spezifisch für die Brandanalyse entwickelt und ist daher in der Lage, die entsprechenden Phänomene zu modellieren. Zudem wurde es für die Brand- und Rauchmodellierung validiert.
- Die Geometrie der Tunnelröhren ist relativ einfach, sodass die FDS-Software die Umstände einfach abbilden kann.
- FDS ist außerdem in der Lage, die Strömungen in der unfallfreien Röhre zu simulieren.
- Das vorgeschlagene Brandszenario liegt im Anwendungsgebiet von FDS.
- FDS findet international häufig Anwendung in der Analyse von Straßen- und Bahntunneln.

6.4.3.1 CFD-Modellgeometrie und Eingaben

In diesem Abschnitt werden die Geometrie und die Eingaben für das CFD-Computermodell beschrieben. Für diese Analyse wurde die gleiche Modellmethodik wie in den vorangegangenen Analysen angewendet. Sofern hier nicht anders angegeben, entsprechen die verwendeten Eingaben denen der vorangegangenen Analysen.

Da ein CFD-Modell des gesamten Tunnels mit einem nicht vertretbaren Rechenaufwand verbunden wäre, wurde ein 1.040 m langer, repräsentativer Tunnelabschnitt angelegt, der zwei Bahnrohre, eine Straßenröhre und die Zentralgalerie (Fluchtweg) des Tunnels umfasst. Die 1.040 m decken die Zuglänge (weniger als 300 m) und etwa 400 m der Röhre auf jeder Seite des verunfallten Zugs ab. Diese Länge ermöglicht eine relativ detaillierte Abbildung der Rauchausbreitung während der Dauer der Simulation (1200 s). Wie aus den Abbildungen in Abschnitt 6.4.3.2 ersichtlich haben die Simulationsergebnisse am Ende des Berechnungsbereichs nur wenig Relevanz; dies bedeutet, dass eine größere Modelllänge die Menge der brauchbaren Daten nicht erhöht hätte.

Es wird davon ausgegangen, dass sich keine fahrenden Züge in der Unfallröhre befinden.

Querschnitte des Modells, in denen alle Tunnelröhren zu sehen sind, sind in **Abbildung 6-3** und **Abbildung 6-4** dargestellt. Das Tunnelbauwerk ist im Modell aus Beton angelegt, der dieselben Materialeigenschaften hat, die auch in den vorangegangenen Analysen verwendet wurden. Die in der vom Unfall betroffenen Bahnröhre angebrachten Ventilatoren, die

Hindernisse darstellen, wurden in das Modell einbezogen, um zu gewährleisten, dass die in der Rauchschicht auftretenden Störungen voll erfasst werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Strahlventilatoren bis zum Abschluss der Evakuierung abgeschaltet bleiben.

Abbildung 6-3: Querschnitt der CFD-Modellgeometrie

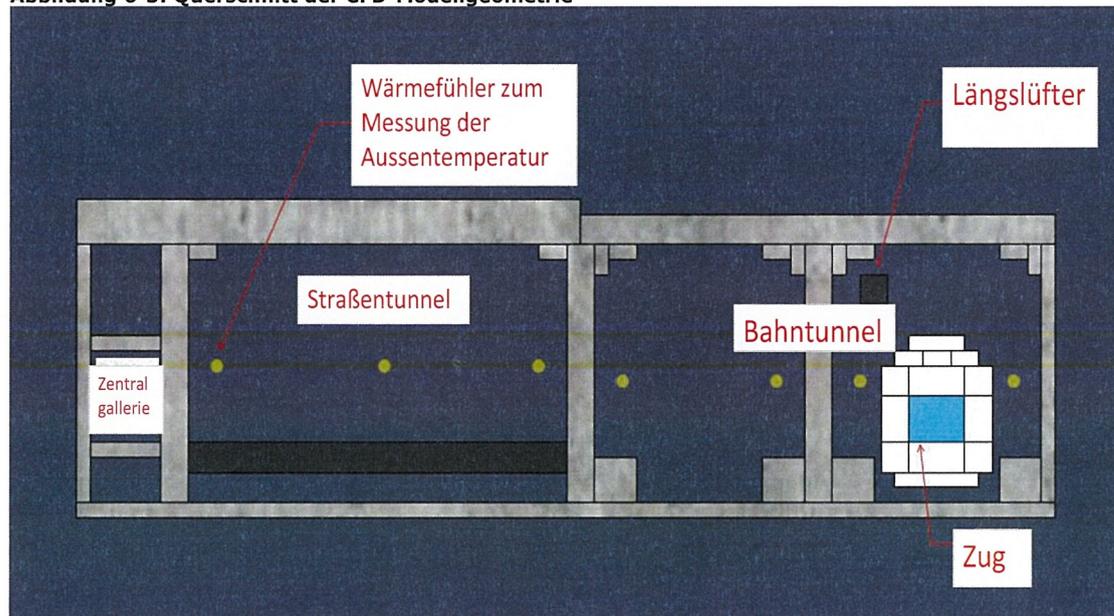
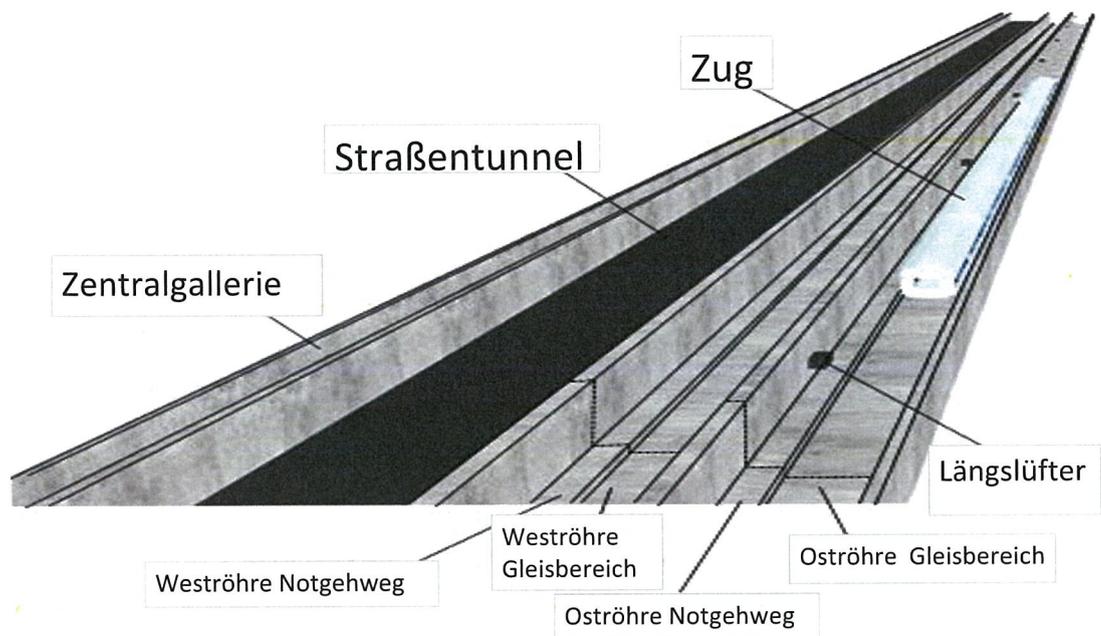


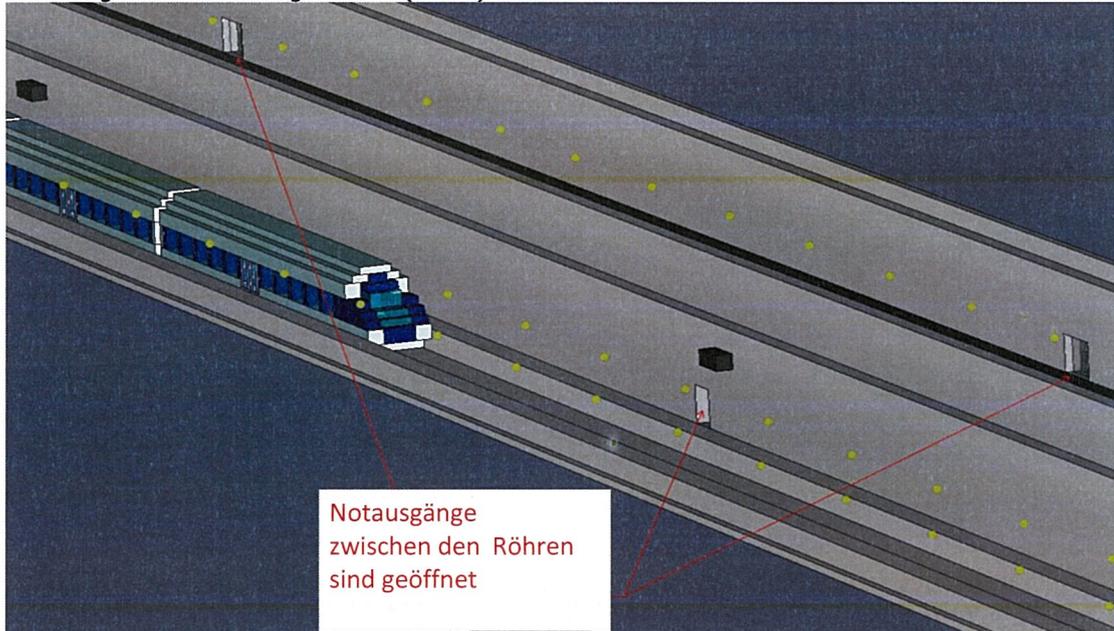
Abbildung 6-4: CFD-Modellgeometrie



Bei der von dem Brand betroffenen Röhre handelt es sich um die äußere (östliche) Bahntunnelröhre, die auf den Abbildungen 6-3 und 6-4 ganz rechts dargestellt ist.

Für die Notausgangstüren (Querschläge) zwischen den Tunnelröhren wird angenommen, dass diese ganz geöffnet sind. Diese Wahl wurde getroffen, um die größtmöglichen Strömungswege für die Verbrennungsprodukte aus der Unfallröhre in die unfallfreie Röhre zu erhalten. Eine vergrößerte Ansicht der Geometrie wird in **Abbildung 6-5** gezeigt.

Abbildung 6-5: CFD-Modellgeometrie (Detail)



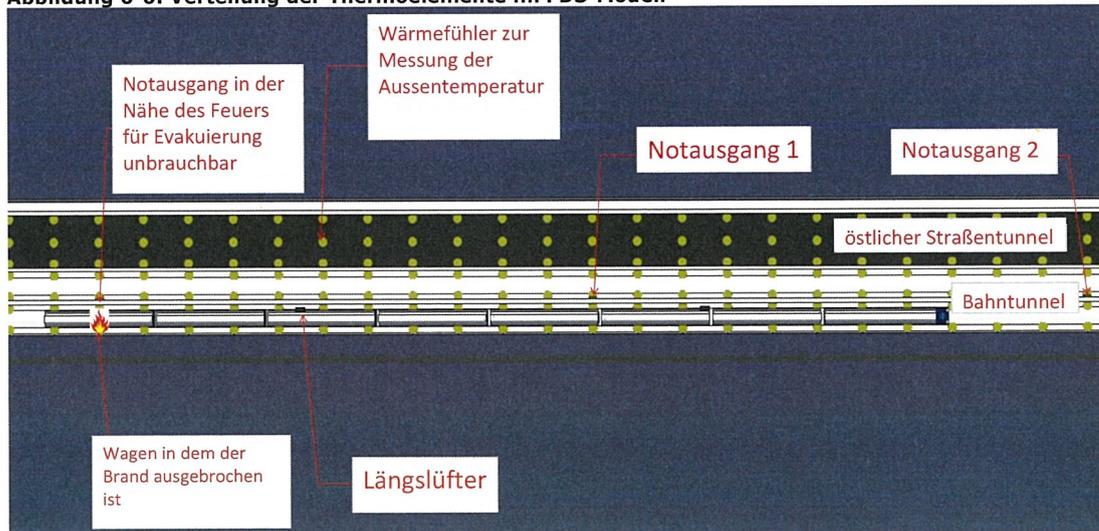
Bei den CFD-Untersuchungen, die im Zuge der Entwicklung der Brandbekämpfungsstrategie (RAT 6724-001) durchgeführt wurden, wurde im Modell jeweils nur eine Tunnelröhre angelegt. Daher waren im Modell keine Türen enthalten. Mit den ursprünglichen Modellen wurde eine versiegelte Röhre analysiert. In der neuen Analyse, deren Gegenstand die Bedingungen außerhalb der Tunnelröhre mit dem Brandherd sind, wurde angenommen, dass alle in dem Modell vorhandenen Türen offen stehen. Dies ist eine konservative Annahme, denn offene Türen erlauben den freien Austausch von Luft, Wärme und Verbrennungsprodukten zwischen den Tunnelröhren.

Zur Eruiierung des schlimmstmöglichen Szenarios für die Analyse des „sicheren Bereichs“ wurden verschiedene Entzündungsorte für den Brand in Betracht gezogen. Der Ausbruch eines Brandes im Personenzug wurde im letzten Wagen angelegt, da dessen Insassen die längste Strecke zu einem Ausgang zurückzulegen haben. Ein Brand im vorderen Zugteil gilt nicht als plausibles „Worst case“-Szenario für den „sicheren Bereich“, weil die Luft aufgrund des Kolbeneffekts des Bahnverkehrs oder der Ventilatoren durch den Tunnel zum in Fahrtrichtung gelegenen Ende geschoben wird (downstream) und alle oder die meisten Fahrgäste durch den hinteren Zugteil entgegen der Fahrtrichtung evakuiert werden können, wo die Luft unbelastet von Schadstoffen ist (upstream).

Der Brand wurde somit im hintersten Teil des letzten Wagens in einem Personenzug mit 8 Wagen (E-Triebwagenzüge, wie sie z. B. auf der Öresundquerung verkehren) angesetzt, siehe **Abbildung 6-2**. Der Zug wurde im Modell mit den Materialien Stahl und Glas angelegt. Es wurde angenommen, dass sämtliche Fenster und Türen des letzten Wagens (Brandherd) vollständig geöffnet sind. Dies ist eine äußerst konservative Annahme, da im Ernstfall nur die zur Flucht dienenden Türen geöffnet wären sowie Fenster, die durch die Wirkung des Feuers beschädigt worden wären, was in den frühen Phasen eines Brandes nicht der Fall ist. Daher wird die Wahrscheinlichkeit eines derartigen Szenarios als sehr gering eingeschätzt.

Das FDS-Modell setzt Thermoelemente (Wärmefühler) voraus, die in allen Röhren im Abstand von 10 m auf einer Höhe von 2 m über den Fluchtwegen angebracht sind. Die Thermoelemente dienen zur Messung von Kohlenmonoxid (ppm), Sicht (m) und Temperatur (°C). Die Positionen der Thermoelemente und die Abstände zwischen ihnen in einem Schnitt des Modells sind in **Abbildung 6-3** dargestellt. Die Laufzeit des Simulationsmodells beträgt insgesamt 20 min (1200 s).

Abbildung 6-6: Verteilung der Thermoelemente im FDS-Modell



Die Umgebungstemperatur im Tunnel wurde mit 20 °C angesetzt.

Um das Risiko des Eindringens von Rauch in die unfallfreie Röhre zu untersuchen, wurden zwei Modelle für die Luftbewegung erstellt:

- Windstille in beiden Tunnelröhren; und
- Luftbewegung in der unfallfreien Tunnelröhre.

Windstille in der Unfallröhre ist eine weniger günstige Situation, da in diesem Fall die Rauchbewegung vor dem Brandherd begünstigt wird.

Zweck der zweiten Variante war eine Risikoanalyse für den Fall, dass die unfallfreie Röhre kurz zuvor von einem Zug durchfahren wurde. Das Modell geht hierbei von einer Windgeschwindigkeit aus, welche den Kolbeneffekt des in der unfallfreien Tunnelröhre vorbeifahrenden Zugs berücksichtigt. Die Windgeschwindigkeit geht über den Verlauf der Simulationsdauer von 5 min (300 s) von 3 m/s auf 0,5 m/s zurück. Nach 300 s weisen beide Tunnelröhren im Modell denselben Luftdruck auf (ohne Berücksichtigung des feuerinduzierten Luftdrucks in der Unfallröhre).

Der im Modell simulierte Brand (also die Brandentwicklungsgeschwindigkeit) hat dieselben Parameter wie in den vorherigen Untersuchungen; diese sind in **Abbildung 6-8** dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine sehr konservative Annahme. Simuliert wird ein Brand mit schneller Ausbreitung, der nach 650 s einen maximalen Wärmeausstoß von 20 MW erreicht. Dies stimmt mit den Empfehlungen des schwedischen METRO-Projekts [13] überein, bei dem u. a. ein Vollbrand in einem Personenzugwagen angenommen wurde. Nach Erreichen dieses Werts verläuft der Brand konstant über den Rest der Simulationsdauer. Im Modell wird also ein sich ausweitender Brand verwendet, der zu einem angenommenen „wirksamen“ – nicht einem realistischen – Entzündungszeitpunkt beginnt. Bei dieser in der Brandschutzforschung bewährten Methode werden Brände mit einem Ausbreitungsfaktor von t^2 simuliert, die zum Zeitpunkt „0“ beginnen und keine wirkliche Entzündungsphase besitzen. Es wird hier angenommen, dass die Entzündungsphase bereits abgelaufen ist (wieder eine sehr konservative Annahme) und die Entstehungsbrand- und Flashover-Phasen sofort einsetzen. Es ist zudem nicht möglich, die Dauer der Entzündungsphase genau zu bestimmen (siehe **Abbildung 6-7**), weshalb diese Phase im Interesse einer belastbaren Berechnung ignoriert wird.

Es ist wahrscheinlich, dass ein Brand im Zug bereits während der Entzündungsphase entdeckt wird (Quelle: Abschnitt 6.5.3.1 in *CIBSE Guide E Fire Engineering*, 2010). Deshalb wird für den simulierten Brand in der CFD-Analyse angenommen, dass er sich bei $t=0$ s entzündet und von den Insassen und dem Zugpersonal erkannt wird und sich anschließend kontinuierlich ausbreitet.

Abbildung 6-7: Darstellung der Brandausbreitung mit Faktor t^2

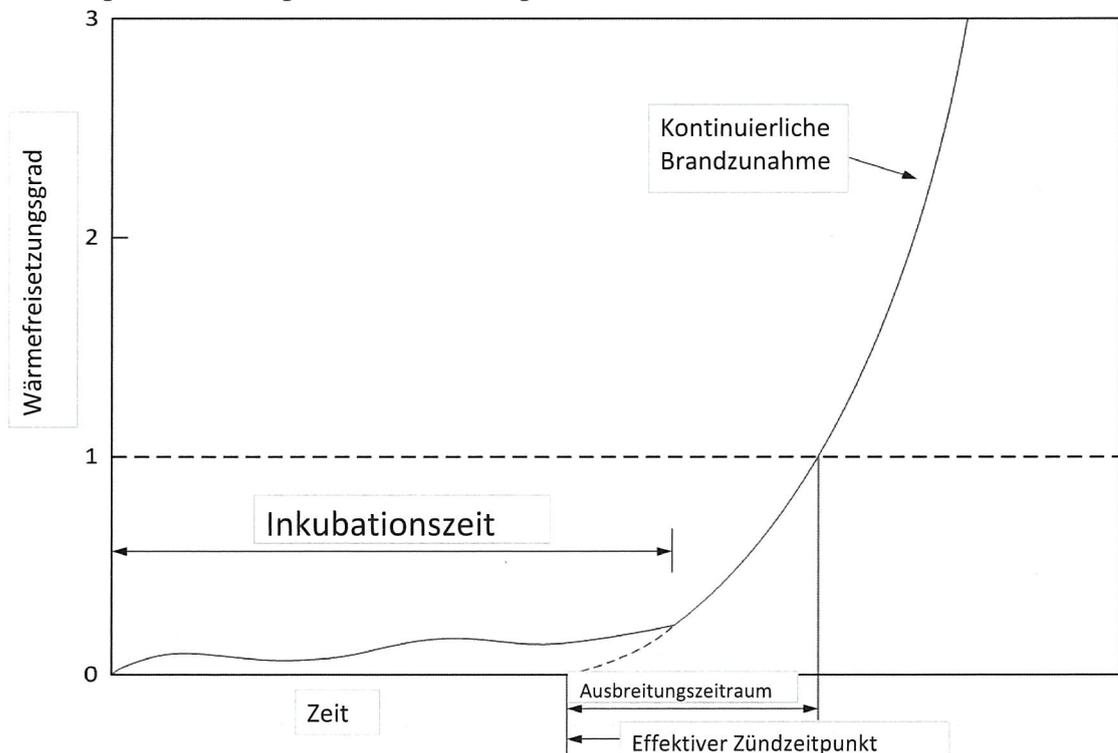
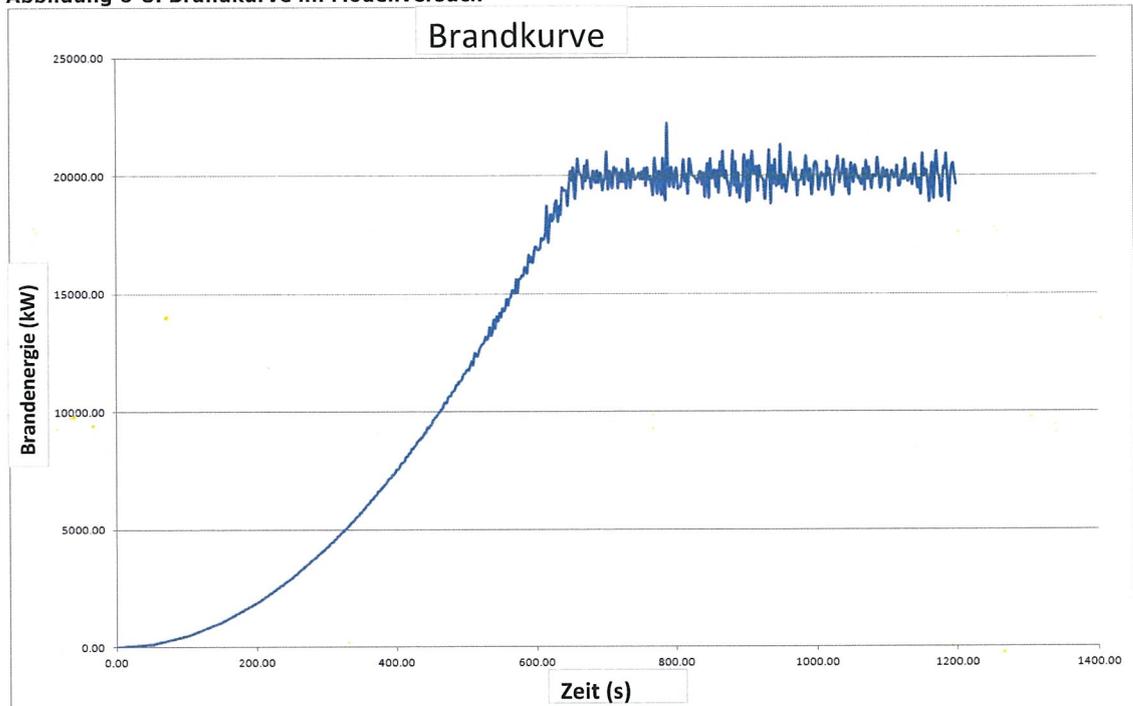


Abbildung 6-8: Brandkurve im Modellversuch



Der Brand beginnt bei $t=0$ exponentiell zu wachsen, bis er 20 MW erreicht. Ab diesem Zeitpunkt sind die Bedingungen stabil. Aus Brandtests an modernen Eisenbahnwagen ist bekannt, dass eine derart schnelle Ausbreitung des Brands gleich zu Beginn unwahrscheinlich ist (bei vor Kurzem in Schweden durchgeführten Versuchen an einem modernen Eisenbahnwagen dauerte es 1,5 Stunden, bis die Vollbrandphase erreicht wurde). Für die vorliegende Analyse wurde im Interesse der Belastbarkeit und der konservativen Annahmen die sofortige Anstiegskurve gewählt.

Somit ist eine extrem steil ansteigende Brandkurve für Personenwaggons, die nach modernen TSI-Standards gebaut wurden, unrealistisch, da solche Eisenbahnwagen neben einer Vielzahl von Sicherheitsvorkehrungen auch über Boden-, Wand- und Deckenbeschichtungen sowie Sitze und andere Materialien verfügen, die Entzündung und Ausbreitung von Feuer hemmen. Deren Wirksamkeit konnte durch Tests nachgewiesen werden.

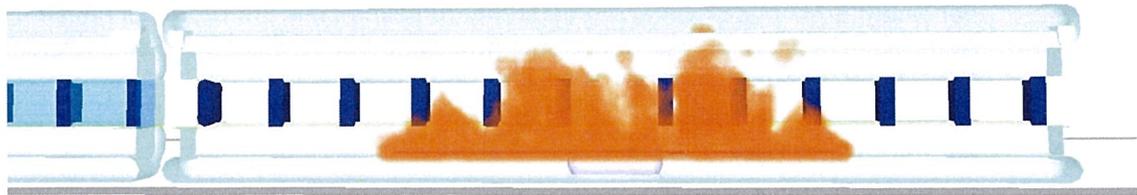
Eine Verlängerung der Brandausbreitungsphase (bis zu dem Punkt, an dem die Bedingungen stabil sind) ist realistisch, wenn keine Löschmaßnahmen eingeleitet werden. In diesem Fall wird der Brand im Extremfall während 10 bis 30 min wachsen, bis er 30–50 MW oder mehr erreicht. Dies gilt indes nur, wenn die Verkleidung der Wagen brennbar ist, sämtliche Türen nach Evakuierung geöffnet bleiben, die Fenster zerbersten und die Luftbewegung im Tunnel 3 m/s oder mehr beträgt, wie das in den Metro-Versuchen in Stockholm der Fall war. Dieses Szenario bedarf auch eines recht großen Brandherds, um das Feuer so stark anzufachen. Es ist anzunehmen, dass das Feuer an diesem Punkt seine maximale Kraft entwickelt. Anschließend geht die Hitzeentwicklung mit Verzehr des Brennmaterials zurück. Für unser Szenario gehen wir von unerschöpflichen Brennstoffquellen aus. Dabei sollte beachtet

werden, dass im Rahmen der Brandbekämpfungsstrategie Löschanlagen in den Bahntunneln empfohlen wurden, um die Risiken einer hohen Brandlast in den Eisenbahntunneln, wie sie bei einem brennenden Güterzug entsteht, zu bekämpfen. Im Brandfall haben die Brandschutzanlagen in den Tunnelröhren während der Evakuierung eines Personenzugs keine hohe Wirkung.

Für das „Worst Case“-Szenario einer Evakuierung mit maximalem Brandwachstum und maximaler (>99. Perzentil) Insassenanzahl wird angenommen, dass sämtliche Überlebende die Unfallröhre innerhalb von 450 s verlassen können. Die Annahme eines sich extrem rasch ausbreitenden Feuers in modernen Zügen geht über das schlimmstmögliche Szenario hinaus. Doch selbst wenn dieser Fall eintreten sollte, dürften sich die Vertretbarkeitskriterien außerhalb des unmittelbaren Brandbereichs wahrscheinlich nicht erheblich vom analysierten Brand, der sich in der Evakuierungsphase rasch ausbreitet, unterscheiden. RAT sind keine Daten bekannt, die für eine extrem rasche Brandausbreitung in einem Eisenbahnwagen sprechen. Eines der Ergebnisse des schwedischen METRO-Projekts war, mit einer durchschnittlichen Brandausbreitungsgeschwindigkeit sowie einer maximalen Wärmeabgabe von 20 MW zu rechnen sein, sofern die Innenraumverkleidungen eines Personenwagens hohen Anforderungen genügen. RAT ist sich bewusst, dass das brandauslösende Feuer sich extrem rasch verbreiten kann (beispielsweise im Falle von Brandstiftung), doch geschieht dies nur während einer begrenzten Zeitdauer und wäre als ein Extremfall zu werten. Nach der Anfangsphase wird sich das Feuer in einem modernen Reisezugwagen voraussichtlich nicht kontinuierlich mit extrem hoher Geschwindigkeit ausbreiten. Dies dürfte sich in einer geringfügig höheren Anzahl Opfer im Brandbereich niederschlagen, was indes das Ergebnis der Gesamtanalyse nicht signifikant beeinflusst und auch nichts an den Bedingungen in dem „sicheren Bereich“ der unfallfreien Bahn- oder Straßenröhre ändert. Die Ergebnisse der vorausgehenden Analyse lassen den Schluss zu, dass während der Evakuierung – ungeachtet des Brandumfangs – außerhalb des unmittelbaren Brandbereichs wahrscheinlich keine unverträglichen Bedingungen erreicht werden und die Bedingungen eines „sicheren Bereichs“ erfüllt sind.

Zum Zweck dieser CFD-Bewertung wird das Feuer im Eisenbahnwagen als flächiger Brand mit folgenden Abmessungen angelegt: 12 m (B) x 1,6 m (T) x 0,2 m (H). Der in der Analyse angewandte CFD-Polynomberechner ist der FDS (*Fire Dynamics Simulator*; dt. Feuersdynamiksimulator), der ein Verbrennungsmodell auf der Grundlage des Verbrennungsluftverhältnisses verwendet. Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass der Verbrennungsvorgang vom Luftverhältnis abhängig ist. Das Verbrennungsluftverhältnis wird verwendet, um Brennstoffe vor der Verbrennung und Verbrennungsprodukte nach der Verbrennung zu erkennen. Die Verbrennungsprodukte werden im Modell zur Berechnung der Sichtverhältnisse und anderer Parameter in Bezug auf die Raueigenschaften ausgewertet. Der Brand (Wärmeabgabe in Bezug auf das Volumen) wird unter Verwendung teils transparenter Ebenen realistisch dargestellt. Die Transparenz des Feuers wird anhand einer Heuristik bestimmt, die auf den vom FDS berechneten Wärmeabgabedaten basiert. Eine grafische Darstellung des für die Untersuchung modellierten Brands wird in **Abbildung 6-9** unten gezeigt.

Abbildung 6-9: Grafische Darstellung des Brandherds im FDS (SmokeView)



Das verwendete Zahlengitter ist wie folgt aufgebaut: Die vom Unfall betroffene Tunnelröhre ist aus Würfeln mit einer Kantenlänge von 0,2 m aufgebaut, während die unfallfreien Tunnelröhren aus Würfeln mit 0,4 m Kantenlänge konstruiert wurden. Dies ergibt ca. 5,7 Millionen Zellen im Computermodell, aufgeteilt auf 12 Gitternetze.

FDS basiert auf einem dreidimensionalen kartesischen Gitter. Der Benutzer definiert die Punkte der Raumgeometrie und legt Dimension und Lokalisierung des Gitters fest. Zur Bestimmung des geeigneten Modellierungsgitters wurde die für den Brand verwendete Gitternetzgröße mit dem typischen Branddurchmesser verglichen.

Die Zellengröße (dx) einer vorgegebenen Simulation lässt sich zum typischen Branddurchmesser (D*) in Beziehung setzen, d. h. je kleiner der typische Branddurchmesser, desto kleiner sollte die Zellengröße sein, damit die Luft- und Gasströme und die Branddynamik adäquat aufgelöst werden können. Die FDS-Studien haben gezeigt, dass eine Gittergröße von rund 0,2 m bei diesem Brandtyp ein hohes Maß an Temperaturkongruenz ergibt.

Der typische Branddurchmesser (D*) bestimmt sich anhand folgender Gleichung:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

wobei gilt:

Q = Wärmeabgabe (kW)

ρ_∞ = Dichte (kg/m³)

c_p = Spezifische Wärme (kJ/kg·K)

T_∞ = Umgebungstemperatur (K)

g = Schwerkraft (m/s²)

Für jede Simulation geht der CFD-Solver (FDS) davon aus, dass der Brand während der gesamten Branddauer von einer einzigen chemischen Reaktion hervorgerufen wird. Der chemische Prozess repräsentiert einen Durchschnitt der im Feuer verbrannten Elemente. Die Software nimmt an, dass das Feuer aus einer unendlich großen Anzahl chemischer Reaktionen besteht.

Für den Zweck der nachfolgenden CFD-Beurteilung wurde Polyurethan als Brennstoff angenommen. Damit konnte ein Großteil des Zugmobiliars abgedeckt werden, einschließlich aus Polymeren hergestelltes Gepäck, was wiederum einer konservativen Annahme entspricht.

Im Modell kam nachfolgende chemische Zusammensetzung zur Anwendung:

- Kohlenstoffatome = 6,3
- Wasserstoffatome = 7,1
- Sauerstoffatome = 2,1
- Stickstoffatome = 1,0
- Rauchentwicklung (Ruß) = 0,1 kg/kg

Wie in den Erfüllungskriterien definiert (vgl. unten), bilden die Sichtverhältnisse das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Bedingungen in den Tunnelröhren. Die Rußentwicklung beeinträchtigt die Sichtverhältnisse auf direkte Weise und ist das wichtigste Verbrennungsprodukt im Hinblick auf die Quantifizierung der Raumbewegung und Kontrolle der Wärmeabstrahlung. Der hohe Rußanteil von 0,1 kg/kg ist daher eine sehr konservative Annahme.

Für die Brandbekämpfungsstrategie für den Tunnel wurden die Auswirkungen eines Brands anhand der Kriterien für eine Beeinträchtigung des Schweregrads III (teilweise Handlungsunfähigkeit) nach Purser beurteilt. Der Schweregrad III definiert sich in erster Linie über die Sichtverhältnisse und erst dann – wenn die Sichtverhältnisse unter die für einen bestimmten Standort festgesetzten Kriterien gefallen sind – über folgende Kriterien:

- Wärmeabstrahlung
- konvektive Temperatur
- toxische Gase – Kohlenmonoxid

Wir weisen darauf hin, dass die Zeitdauer bis zum Sichtverlust in der Regel Vorrang vor dem Kriterium der ansteigenden konvektiven Temperatur oder der Handlungsunfähigkeit oder Letalität infolge Abgabe toxischer Gase hat. Deshalb bilden die Sichtverhältnisse in dieser wiederum sehr konservativen Analyse das entscheidende Kriterium.

6.4.3.2 CFD-Ergebnisse

6.4.3.2.1 Modell 1: Keine induzierte Luftbewegung in den Tunnelröhren

Die Ergebnisse für Modell 1 der Modelluntersuchung werden nachfolgend dargestellt. Die in **Abbildung 6-10** und **Abbildung 6-11** veranschaulichten Ergebnisse zeigen die Sichtverhältnisse bzw. die Temperatur in einem Tunnellängsschnitt 378 s nach Ausbruch des Brands, also zu

dem Zeitpunkt, an dem die Evakuierung der Unfallröhre abgeschlossen ist (siehe Abschnitt 6.4.4.2).

Abbildung 6-10: Modell 1, Sicht (m), Längsschnitt durch den Brand nach 378 s

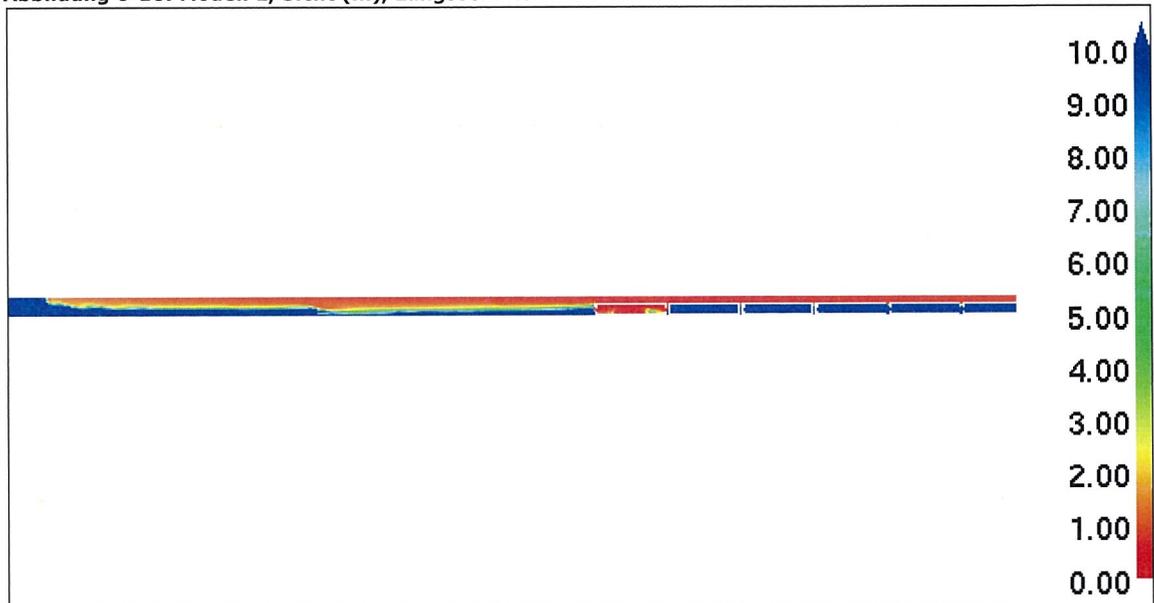


Abbildung 6-11: Modell 1, Temperatur (°C), Längsschnitt durch den Brand nach 378 s

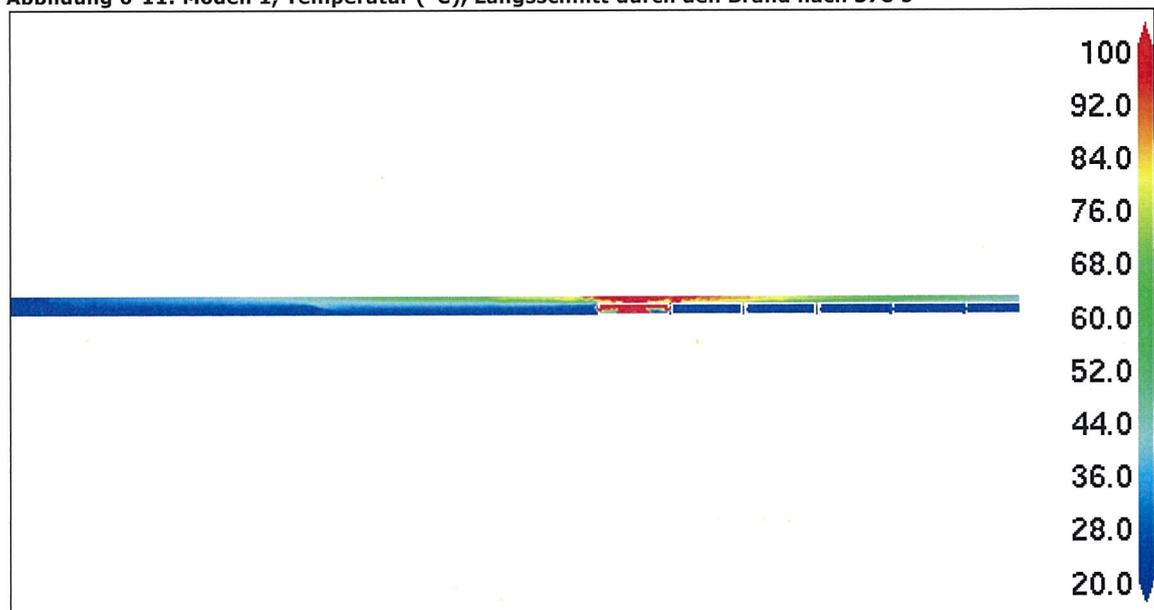


Abbildung 6-12: Modell 1, Sicht (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 378 s

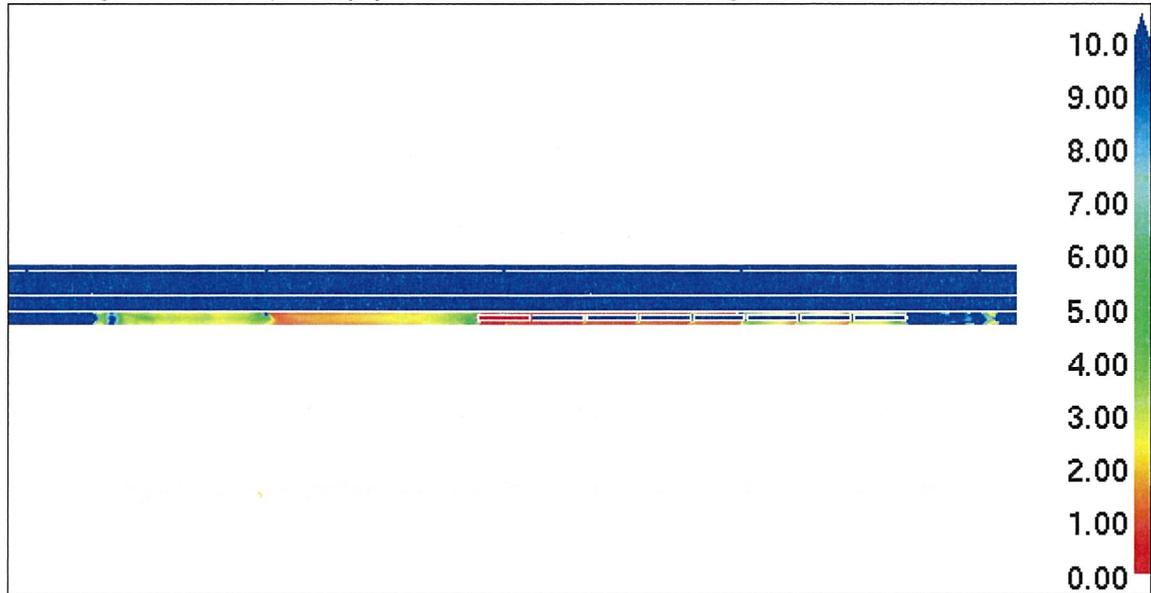
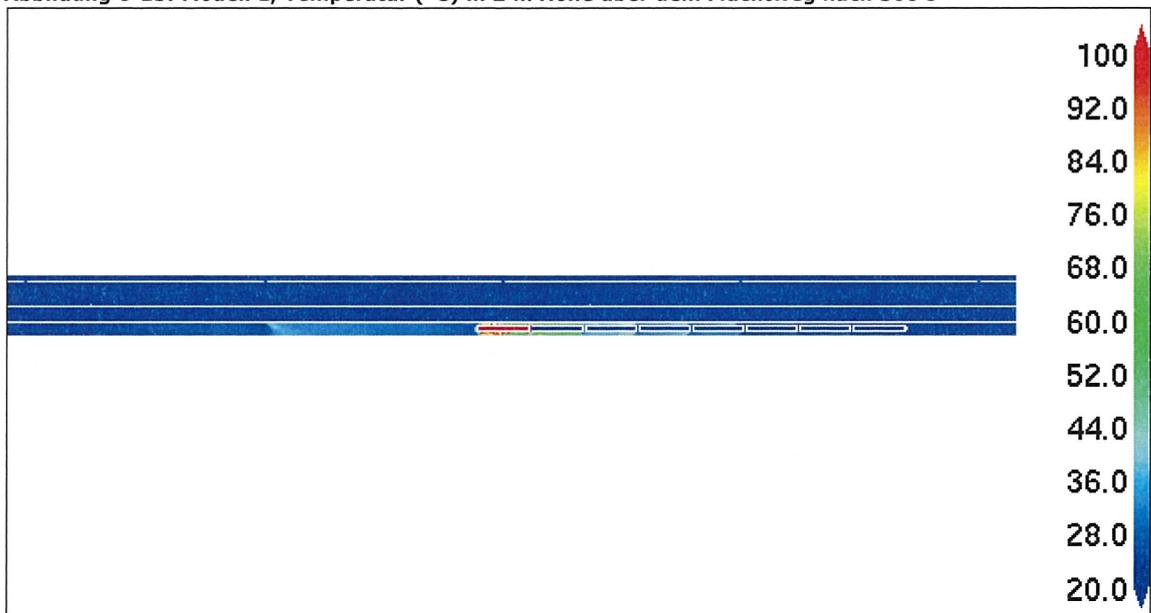


Abbildung 6-13: Modell 1, Temperatur (°C) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 300 s

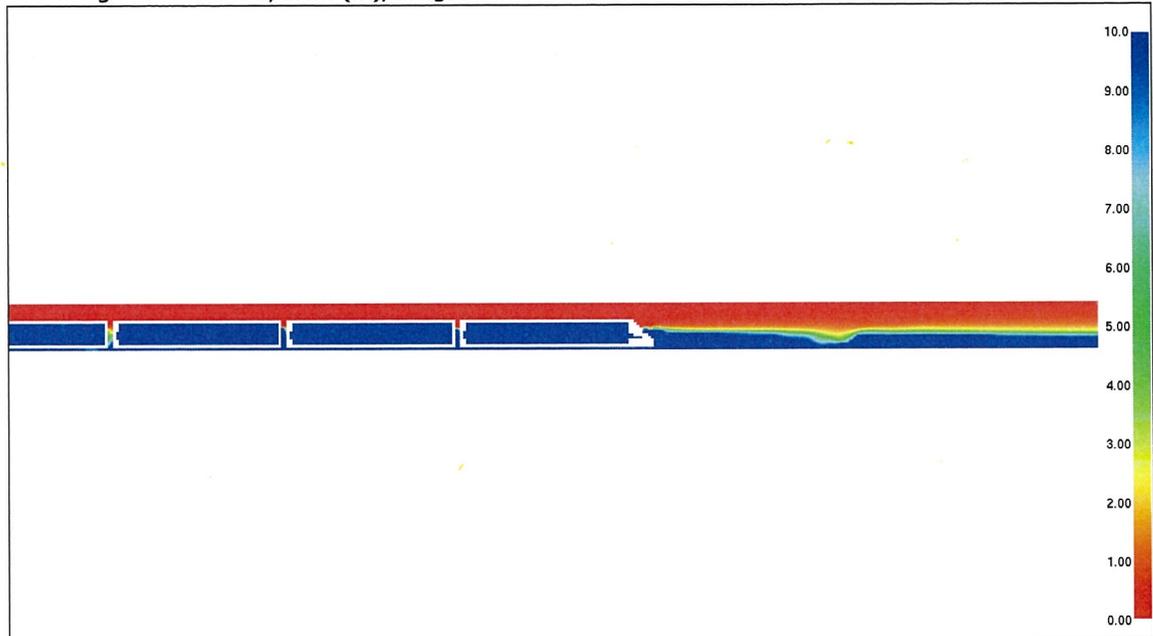


Die Ergebnisse zeigen, dass während der Dauer der Simulation kein Rauch in die benachbarte Tunnelröhre dringt.

Es dringt jedoch frische Luft durch die offenen Querschläge/Notausgänge aus den nicht vom Unfall betroffenen Tunnelröhren in die Unfallröhre (zu sehen an der Turbulenz in der Rauchsicht vor dem Zug in **Abbildung 6-14** unten). Dies liegt daran, dass die Türen sich auf einem niedrigeren Niveau befinden als der heiße Rauch, der darüber schwebt. Der Rauch

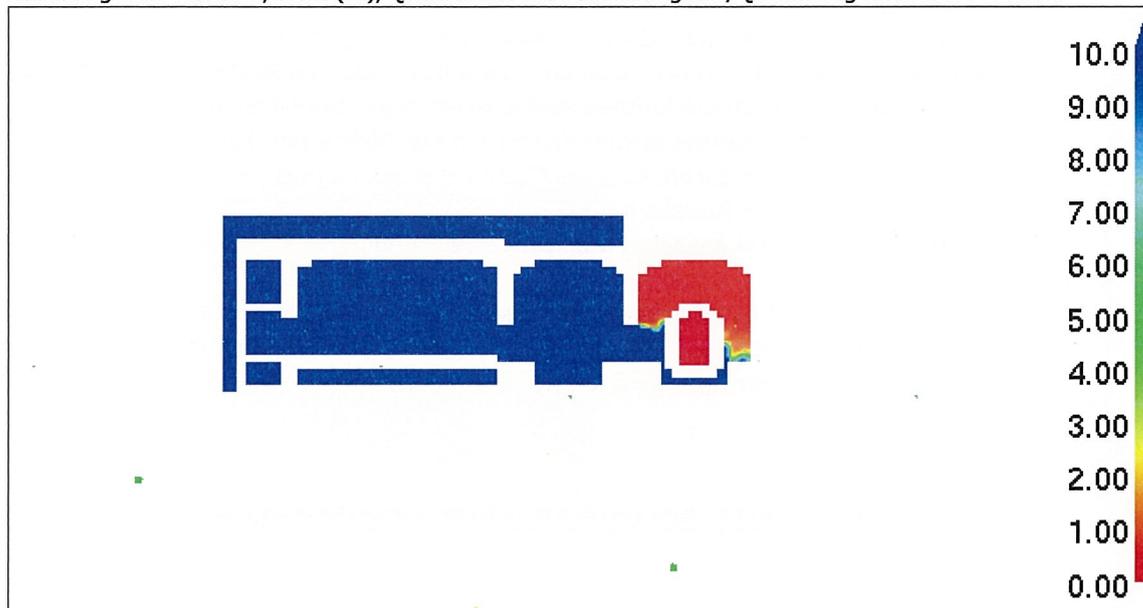
bewegt sich in der Unfallröhre in beiden Richtungen des Tunnels (und erreicht das in Fahrtrichtung gelegene Ende des Bauwerks nach ca. 700 s sowie das entgegen der Fahrtrichtung gelegene Ende nach ca. 900 s).

Abbildung 6-14: Modell 1, Sicht (m), Längsschnitt nach 522 s



Die Luftzufuhr stört die Rauchschicht und zieht sie örtlich herunter, wobei dieser Effekt erst nach ca. 500 s eintritt. Ein solcher Zustrom von Luft kann im wirklichen Tunnel zwar vorkommen, ist im Modell aber im Verhältnis zur Realität wahrscheinlich übertrieben. Dies liegt daran, dass nur ein Teil des Tunnels für das Modell programmiert wurde und die über die Länge des Tunnels auftretenden Druckverluste wahrscheinlich zu einer Abschwächung dieser Luftströmungen führen werden. Dieser Effekt wird zudem durch die Annahme verstärkt, dass alle Türen zwischen den Tunnelröhren offen stehen. Trotz dieser Abweichungen sind die Ergebnisse der Modellsimulation hinsichtlich der Ausbreitung des Rauchs mit denen der Originaluntersuchung vergleichbar.

Abbildung 615: Modell 1, Sicht (m), Querschnitt mit Verbindungstür/Querschlag nach 378 s ~ 1200 s

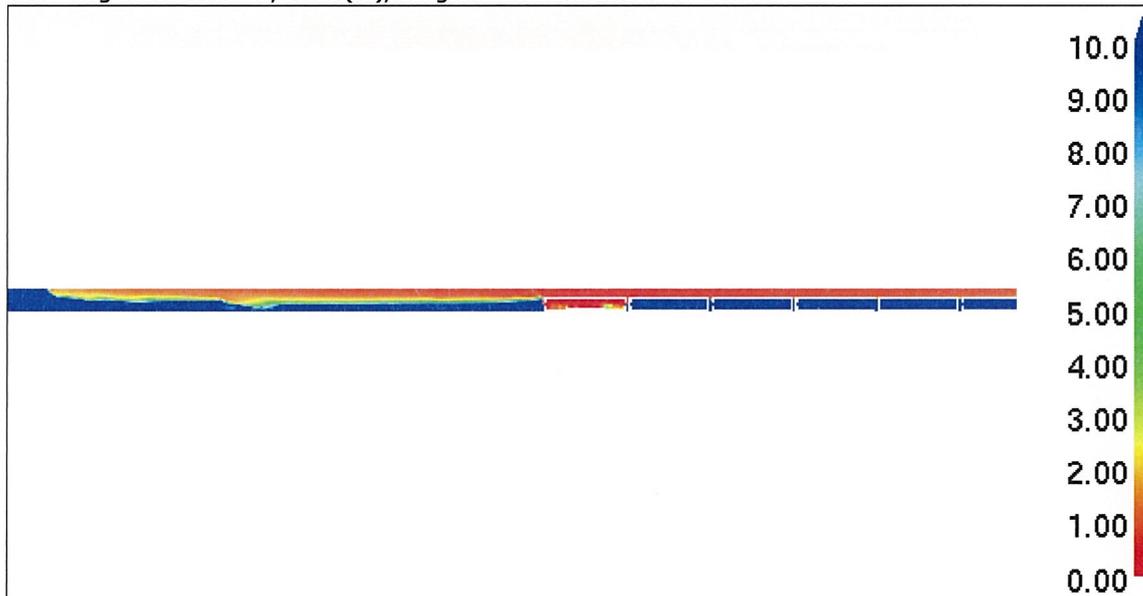


6.4.3.2.2

Modell 2: Induzierte Luftbewegung in der unfallfreien Bahnöhre

Die Ergebnisse in Modell 2 zeigen qualitativ ähnliche Ergebnisse wie Modell 1, jedoch mit einem Anstieg der Turbulenz, wie sich durch einen Vergleich von **Abbildung 6-10** mit **Abbildung 6-16** zeigen lässt.

Abbildung 6-16: Modell 2, Sicht (m), Längsschnitt nach 378 s



Ein weiterer merkbarer Unterschied zwischen Modell 1 und Modell 2 ist ein kurzer Zeitabschnitt (ca. 80 bis 100 s), in dem eine geringe Menge Rauch aus der Unfallöhre in die unfallfreie Bahnöhre strömt. Diese Strömung setzt bei etwa 500 s ein und endet bei 580 s

und wiederholt sich im Zeitraum zwischen 620 s bis 720 s. Die Strömung bei 580 s ist in **Abbildung 6-17** und die bei 680 s in **Abbildung 6-18** dargestellt. Eine ähnliche Strömung setzt erneut ein, wenn der Rauch nach ca. 750 s das Ende des Modellbereichs erreicht. Die Strömung wird durch die Luftgeschwindigkeit in der unfallfreien Bahnöhre verursacht, doch aufgrund deren Abnahme strömt der Rauch nur über einen kurzen Zeitraum in die unfallfreie Röhre ein. Das liegt daran, dass im Modell alle Querschläge/Notausgänge offen stehen. Dieses Strömen des Rauchs in die Querschläge und die unfallfreie Bahnöhre hinein ist auch in **Abbildung 6-19** und **Abbildung 6-20** dargestellt und zwar 710 s nach Brandbeginn.

In der Praxis wird es vermutlich nicht zu einem Eindringen von Rauch in den unfallfreien Tunnel kommen, da die Evakuierung in den unfallfreien Tunnel in sehr viel kürzerer Zeit, und zwar in weniger als 400 s, erfolgt und anschließend alle Notausgänge geschlossen werden.

Abbildung 6-17: Modell 2, Sicht (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 580 s

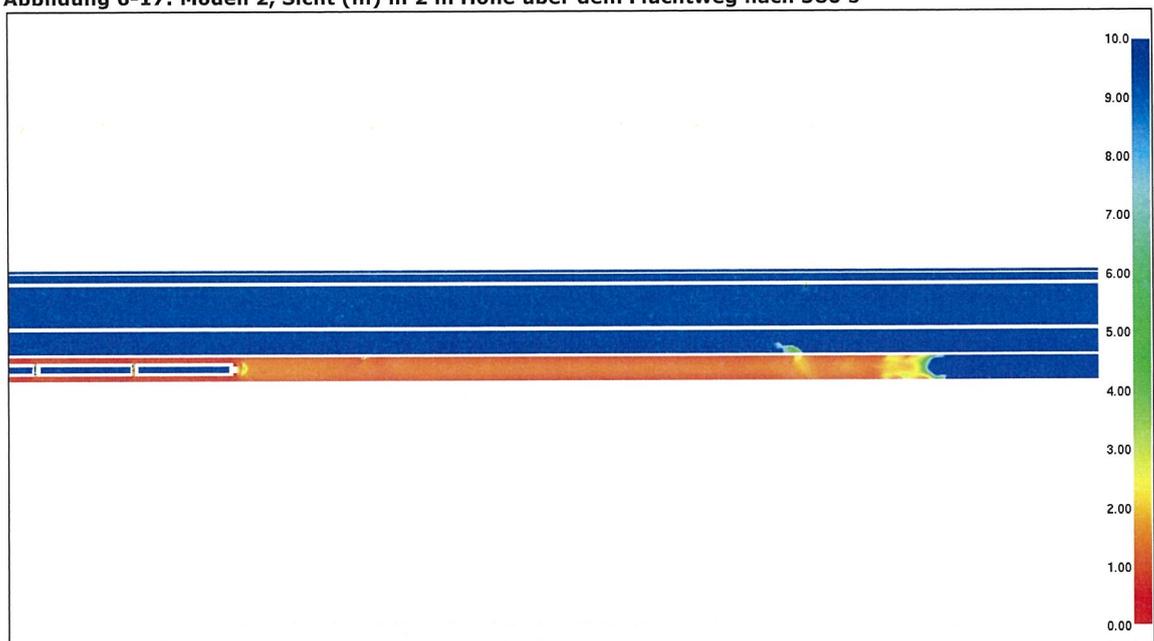


Abbildung 6-18: Modell 2, Sicht (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 680 s

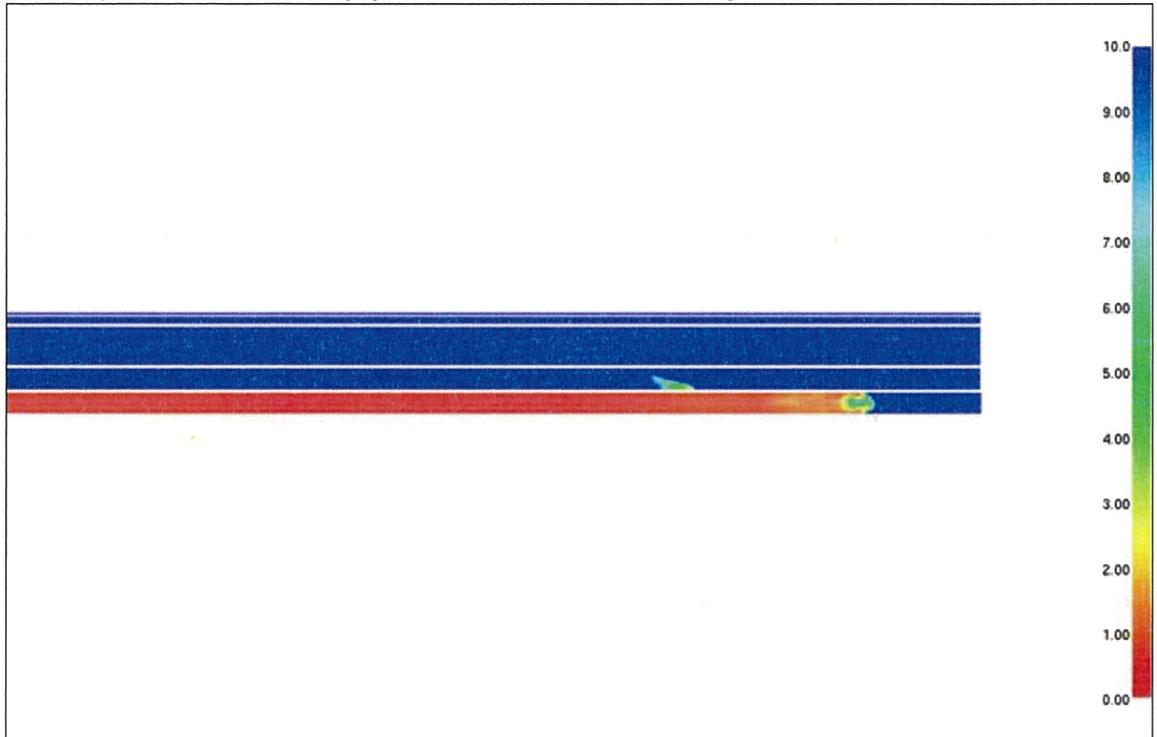


Abbildung 6-19: Modell 2, Sicht (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 710 s

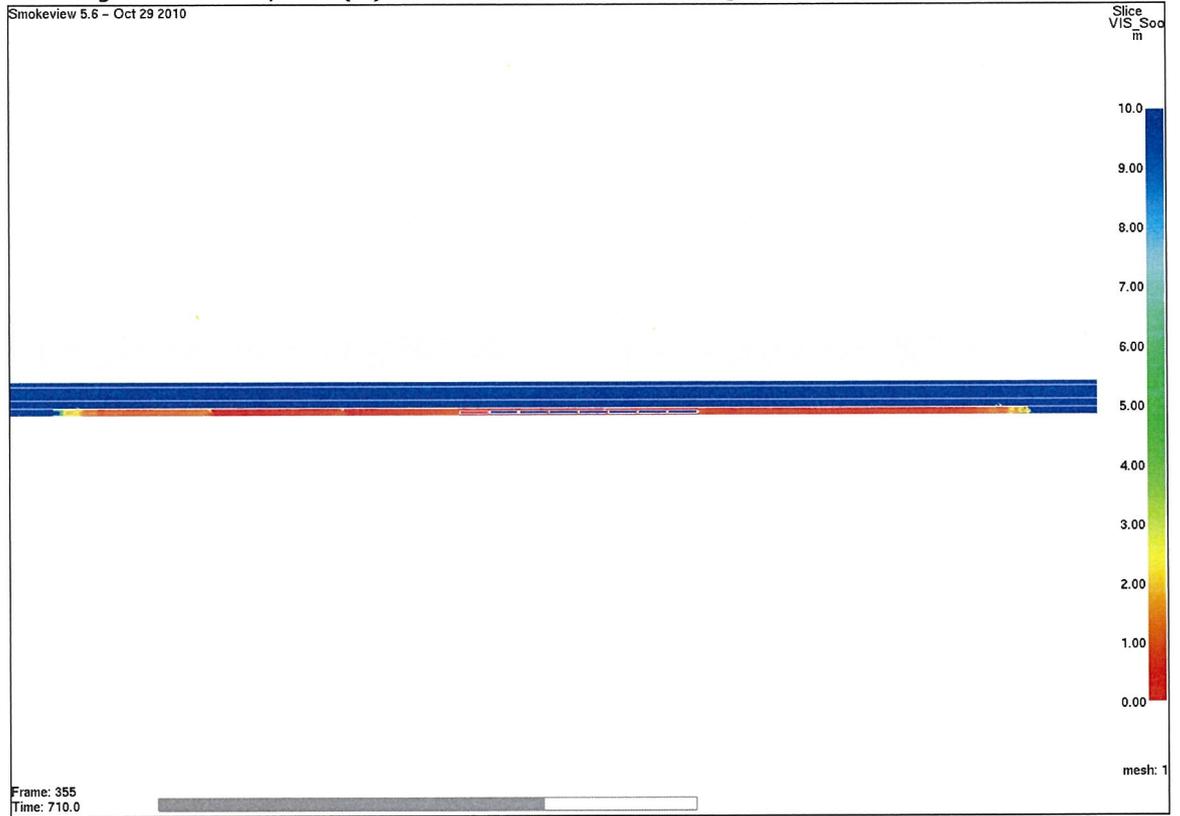
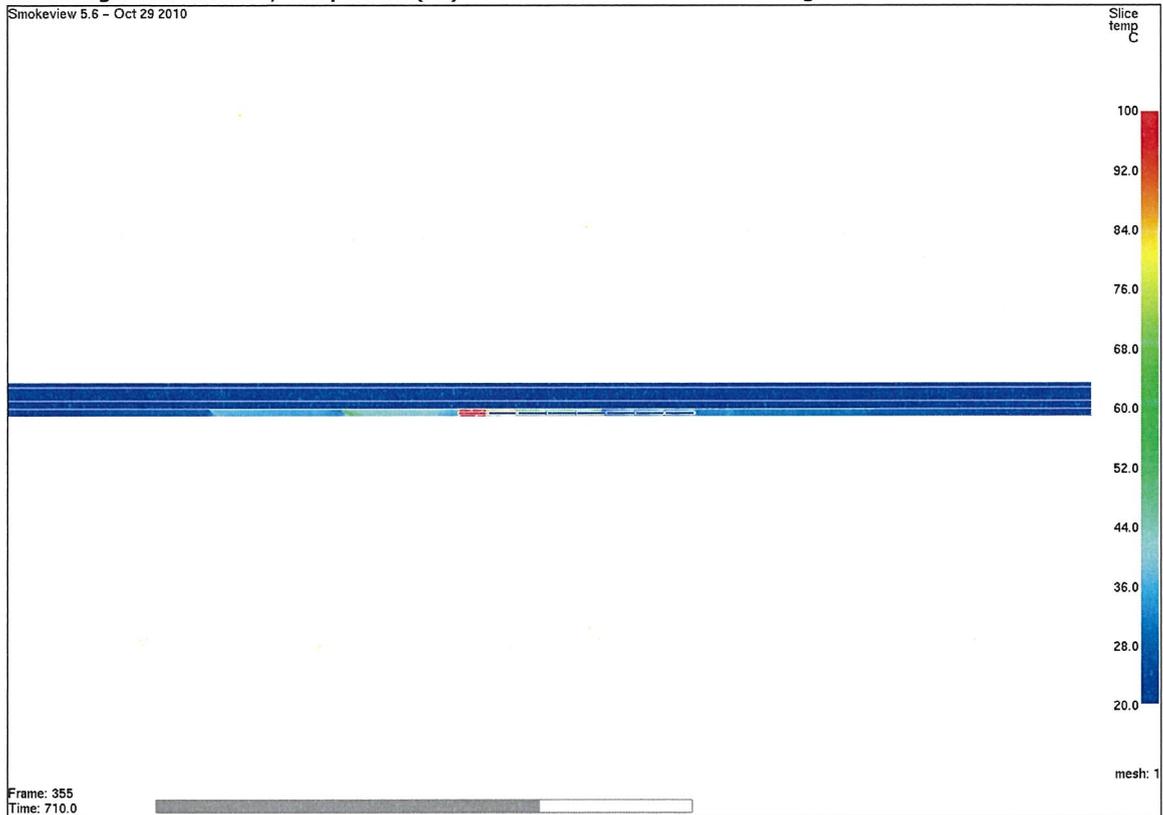


Abbildung 6-20: Modell 2, Temperatur (°C) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 710 s



6.4.3.3

Schlussfolgerungen aus der CFD-Analyse

Für Modell 1 zeigt das CFD-Modell das Vorhandensein von sicheren Bedingungen im Tunnel außerhalb der vom Unfall betroffenen Röhre auf, und zwar in der benachbarten Bahnöhre und der dahinter verlaufenden Straßenöhre.

In Modell 2 strömt Rauch in die unfallfreie Bahnöhre, wenn auch nur über einen kurzen Zeitraum von max. 100 s, allerdings erst nach Abschluss der Evakuierung. Dies geschieht, während die Rauchschicht sich in Fahrtrichtung ausdehnt und auf einen geöffneten Querschlag/Notausgang trifft. Hier ist erneut anzumerken, dass im Modell alle Türen als vollständig geöffnet programmiert wurden. Bei einem wirklichen Unfall ist davon auszugehen, dass nicht alle Türen geöffnet sind und dass alle Türen nach Abschluss der Evakuierung geschlossen werden. Diese Simulation zeigt, dass geringe Mengen Rauch in den unfallfreien Tunnel strömen. Wenn dies allerdings in dem seltenen Fall eintritt, dass eine Tür nach der Evakuierung nicht schließt, wird der Rauch schnell verdünnt und somit verträglich, wodurch der Bereich, in dem unverträgliche Bedingungen herrschen, sehr klein ausfallen würde. Daher ist für Modell 2 ebenfalls die Schlussfolgerung zu ziehen, dass mit dem CFD-Modell das Vorhandensein sicherer Bedingungen auf den Fluchtwegen im Tunnel außerhalb der von dem Unfall betroffenen Bahnöhre nachgewiesen ist.

Die Ergebnisse dieser CFD-Studie stimmen mit früheren Untersuchungen überein, durch die in der von dem Unfall betroffenen Tunnelöhre ASET-Zeiten von 300 s im Bereich des

Eisenbahnwagens mit dem Brandherd ermittelt wurden. Die vorliegende Analyse zeigt, dass die ASET-Zeit im Bereich des brennenden Wagens ca. 320 s beträgt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Bedingungen außerhalb dieses Bereichs – auf den Fluchtwegen – sowohl innerhalb als auch außerhalb der vom Unfall betroffenen Röhre über die gesamte Modelllaufzeit erträglich waren, d. h. Zuginsassen, die sich aus diesem Bereich entfernt haben, sind für mehr als 1200 s sicher.

6.4.3.4

Lüftungsanlage, Druckregelung, Eisenbahnröhren

Die CFD-Simulationen zeigen, dass unter bestimmten Bedingungen ein geringfügiger Raucheintritt in die angrenzende Röhre erfolgen kann:

- Die Sicht wird 5 bis 10 m eingeschränkt, allerdings nicht über den gesamten Querschnitt der Röhre.
- Der Sichtverlust tritt nur über eine begrenzte Länge ein, d. h. ca. 10 m.
- Der Sichtverlust ist auch zeitlich begrenzt, wobei die Dauer zwischen 80 und 100 s liegt.
- Der Sichtverlust tritt nur dann ein, wenn mehrere Türen geöffnet bleiben.
- Der Sichtverlust tritt nach Abschluss der Evakuierung in die unfallfreie Bahnöhre ein; es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt alle Türen geschlossen sind – siehe Evakuierungszeiten in Abschnitt 6.4.4.2.

Folglich beeinträchtigt der Raucheintritt in die unfallfreie Röhre nicht die Verträglichkeit der Bedingungen in dieser Röhre.

Wenn aber im Rahmen der Betriebsplanung entschieden wird, die Möglichkeit des Eindringens von Rauch in die nicht betroffene Tunnelöhre zu verringern, kann eine Überdruck-Regelung aktiviert werden. Dementsprechend ist die Einbeziehung der Lüftungssystemfunktion als Teil des gesamten Konzeptes für den „Sicheren Bereich“ sowohl für den Bahn- und den Straßentunnel erforderlich.

Dies erfordert den Betrieb der Lüftungsanlage in der benachbarten, nicht vom Ereignis betroffenen Tunnelöhre, um dort eine ausreichende Druckerhöhung zu kontrollieren, d. h. die Bereitstellung eines Überdrucks gegenüber dem Druck in der Unfallöhre. Dieses System kann mit der Bereitstellung von Unterdruck in der Unfallöhre nach dem Brandherd kombiniert werden.

Der Druck, der durch ein Feuer im Tunnel erzeugt wird, bewegt sich mit geschätzten weniger als 10 Pa in einem relativ kleinen Ausmaß. Deshalb wird in der nicht betroffenen Tunnelöhre ein relativ kleiner Druckaufbau benötigt, um das Eindringen von unbedeutenden Rauchmengen zu verhindern.

Es können jedoch zusätzlich zu den bereits in Abschnitt 6.4.3.4 beschriebenen Kräften noch andere Kräfte vorhanden sein, die sich auf die Druckverhältnisse in der unfallfreien Röhre auswirken.

Jeder fahrende Zug in der unfallfreien Röhre erzeugt hinter sich einen Unterdruck. Wie in Anlage 1 erläutert erhalten diese Züge sofort die Anweisung, die Geschwindigkeit zu verringern (im Folgenden wird von maximal 40 km/h ausgegangen). In einem Zugbetriebsszenario, bei dem mehrere Züge hintereinander auf dem Gleis stehen, können

sich maximal drei Züge gleichzeitig in der unfallfreien Röhre befinden (wobei dies wie in Abschnitt 3 erläutert während des Normalbetriebs nicht passieren kann). Jeder Zug, der sich in der unfallfreien Röhre dem vom Brand betroffenen Block der benachbarten Röhre nähert, wird angehalten. Wenn in der unfallfreien Röhre dennoch zwei Züge mit 40 km/h fahren, beläuft sich der durch diese Bewegung verursachte Unterdruck im schlimmsten Fall auf 50 Pa, wobei sich die fahrenden Züge relativ nahe am verunfallten Zug befinden.

Neben diesem Druck könnten bestimmte externe Faktoren ebenfalls die Druckverhältnisse in der unfallfreien Röhre beeinflussen. Diese Faktoren wurden nicht als Grenzbedingungen für das CFD-Modell berücksichtigt und werden daher im Folgenden separat behandelt.

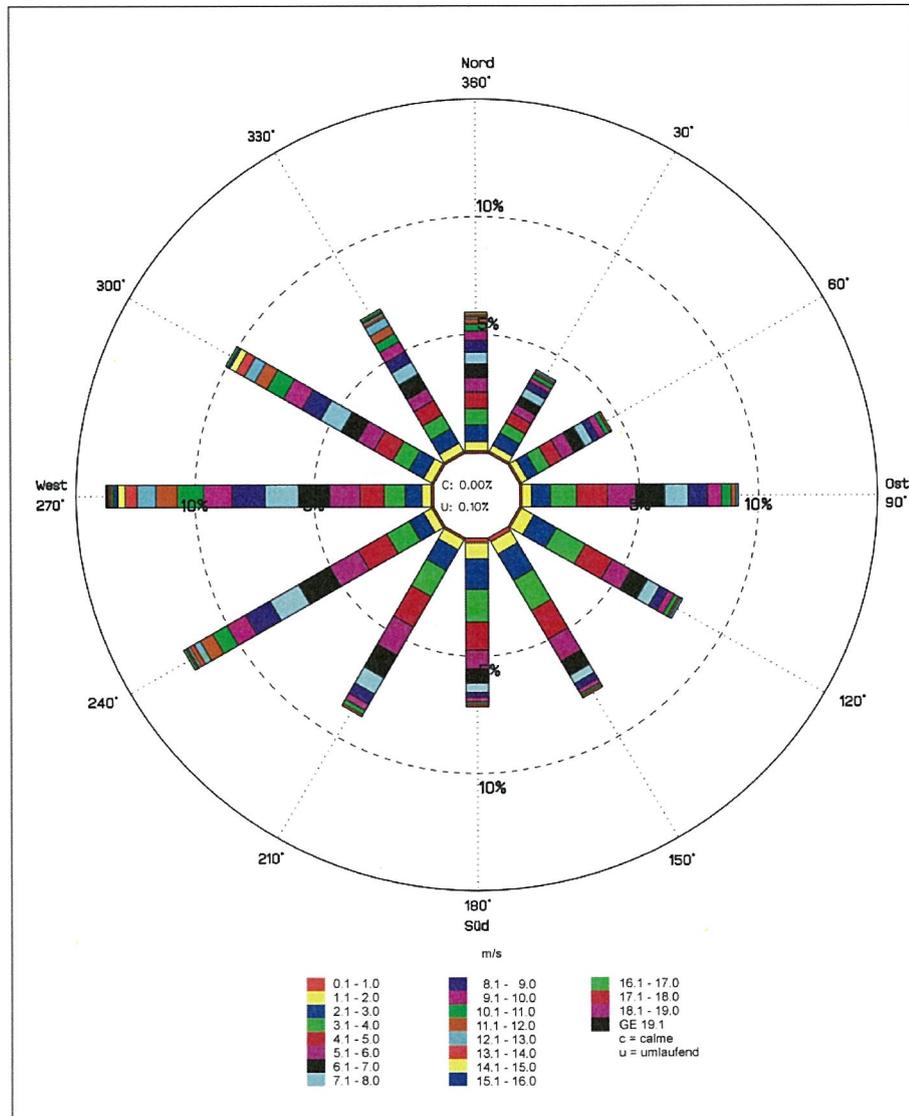
Die folgenden Auswirkungen wurden ermittelt und quantifiziert:

Tabelle 6.2:

Auswirkung	Druck [Pa]
Windinduzierter Druck am Portal	45 ¹⁾
Luftdruckunterschied zwischen Portalen	0 ²⁾
Kamineffekte unter normalen Bedingungen – Winter und Sommer	14 ³⁾
Insgesamt	59

¹⁾ Anhand der Daten der Wetterstation „Westermarkelsdorf“ auf der Insel Fehmarn, die sich 11,7 km vom Portal Fehmarn entfernt befindet, wurden die Windbedingungen an den Portalen Fehmarn und Lolland auf Grundlage der Windrose derselben Wetterstation ermittelt, siehe Abbildung unten.

Der am Portal wirkende windinduzierte Druck wird normalerweise definiert als der dynamische Druck der Windkomponente parallel zur Tunnelachse am Portal. Das 95. Perzentil zeigt an, dass auf 10 m über NN 11,2 m/s auf Fehmarn und 11,7 m/s auf Lolland möglich sind. Für ein exponiertes Portal würde die volle Geschwindigkeit in Betracht gezogen; da aber die Portale nach innen versetzt gebaut sind und der Tunnel teilweise unter der Erde verläuft, wird auf Grundlage von Experimenten nur 50 % des dynamischen Drucks berücksichtigt. Demzufolge wird am Portal ein Winddruck von 45 Pa angenommen, was einer Geschwindigkeit von 8,5 m/s des in das Tunnelportal strömenden Windes entspricht.



Windrose in Westermarkelsdorf, 10 m über Normalnull

2) Dies tritt normalerweise ein, wenn zwischen den beiden Tunnelportalen erhebliche Höhenunterschiede bestehen, wie zum Beispiel in Bergregionen. In diesem Fall ist der Luftdruckunterschied nicht signifikant.

3) Die Röhren des Absenktunnels befinden sich unterhalb des Meeresbodens, der als Wärmesenke fungiert und dadurch die Temperatur der Tunnelwand stabilisiert. Die Wärmeabstrahlung der Züge erwärmt die Luft im Tunnel auf eine Temperatur über der außerhalb des Tunnels, allerdings ist davon auszugehen, dass der Temperaturunterschied selbst unter Extrembedingungen im Sommer und im Winter nicht mehr als 10 °C beträgt, was 3 % ΔT im Vergleich zur Umgebung auf der Kelvin-Skala entspricht. Daher wird

mit einem negativen 3-%-delta-Wert für Luftdichte bzw. $0,036 \text{ kg/m}^3$ gerechnet. Angesichts der maximalen Tiefe des Absenktunnels von 38 m wird mit einem maximalen Kamineffekt von 14 Pa gerechnet.

Das geplante Belüftungskonzept in den Bahnröhren beruht auf der Längslüftung mittels bidirektionaler Strahlventilatoren, die in jedem Tunnel über die gesamte Länge verteilt sind. Abbildung 6.21 zeigt einen typischen Querschnitt der Röhre mit einem in der oberen linken Ecke angebrachten Strahlventilator. Die Ventilatoren können theoretisch bis in einem Mindestabstand von 70 bis 80 m installiert werden. Dieses Konzept bietet ein hohes Maß an Flexibilität sowohl in Bezug auf die Luftströmungsregelung als auch die Druckregelung in den Tunnelröhren.

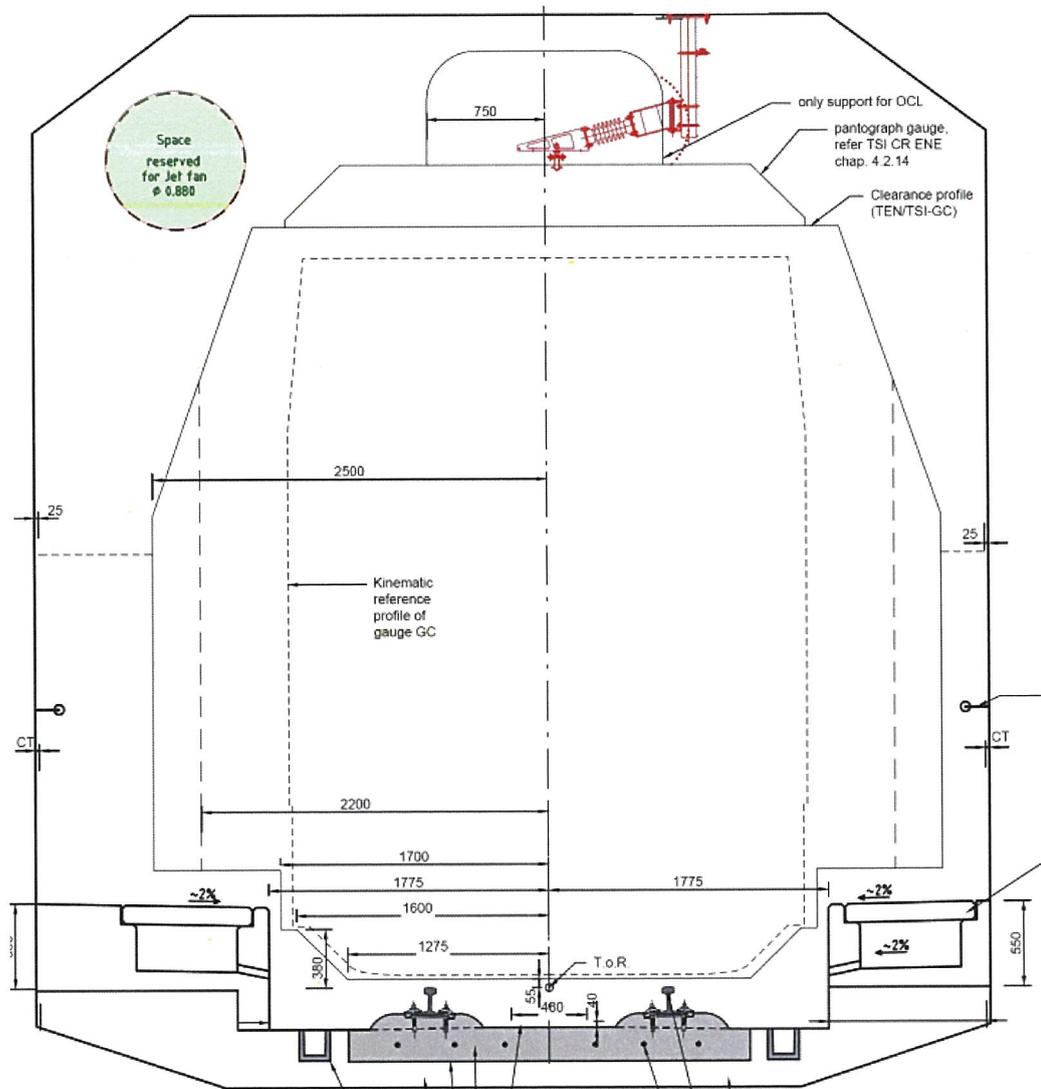


Abbildung 6-21: Typischer Querschnitt der Bahnöhre

English	German
Space reserved for Jet fan Ø 0.880	Raum für Strahlventilator Ø 0,880
only support for OCL	Nur Träger für OCL
pantograph gauge, refer TSW CR ENE chap. 4.2.14	Stromabnehmerbegrenzungslinie siehe TSI CR ENE, Kap. 4.2.14
Clearance profile (TEN/TSI-GC)	Lichtraumprofil (TEN/TSI-GC)
Kinematic reference profile of gauge GC	Kinematische Begrenzungslinie GC

Der in jeder Röhre benötigte Luftstrom hängt vor allem von der in Abschnitt 6.3 erläuterten kritischen Geschwindigkeit ab. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen externer Kräfte auf den Druck berücksichtigt werden. Schließlich sind, wenn ein Überdrucksystem vorgesehen ist, zusätzliche Ventilatoren notwendig, um den benötigten Schub bereitzustellen.

Ein normaler Strahlventilator (Innendurchmesser 710 mm, Schub 760 N, Leistungsgrad 80 %) generierte eine Druckerhöhung von ungefähr 15 Pa in der Bahnöhre.

Auf Grundlage der oben genannten Punkte kann die folgende Übersicht gegeben werden:

Tabelle 6.3:

Faktor	Erforderlicher Schub [Pa]	Entsprechende Anzahl von Strahlventilatoren
Erreichung der kritischen Geschwindigkeit	-	Schätzungsweise 30 – 60 (abhängig von den endgültigen Planungsforderungen und der Ausführungsplanung des Bauunternehmens)
Externe Faktoren (aus Tabelle 6.2)	59	4
Sog durch fahrende Züge	50	4
Durch Feuer erzeugter Überdruck	10	1

Die Tabelle zeigt, dass insgesamt neun zusätzliche Ventilatoren benötigt werden, wenn alle denkbaren Auswirkungen auf die Druckverhältnisse in den Bahnöhren in der gleichen (ungünstigen) Richtung zum Tragen kommen. Der geplante Querschnitt ermöglicht, dass diese Ventilatoren in jeder Bahnöhre leicht untergebracht werden können.

Die Strahlventilatoren könnten gleichmäßig im größten Teil des mittleren Abschnitts der Bahnöhre verteilt werden, allerdings wird in der Nähe der Portale eine höhere Dichte der Strahlventilatoren (z. B. 5 Strahlventilatoren innerhalb von 500 m des Portals) empfohlen. Wie bereits gesagt, kann der Abstand zwischen zwei Ventilatoren 70 bis 80 m betragen. Dadurch kann der Druck sowohl in der Unfallöhre als auch in der unfallfreien Röhre bei einem Zugbrand in der Nähe des Portals besser kontrolliert werden.

In der Unfallöhre besteht der Vorteil darin, dass mehr Strahlventilatoren in Fahrtrichtung vor einem brennenden Zug in der Nähe des Portals aktiviert werden können, wodurch in der Unfallöhre ein Unterdruck erzeugt werden kann, um die Rauchverbreitung einzudämmen. In der nicht vom Unfall betroffenen Röhre können wenige Strahlventilatoren in entgegengesetzter Richtung der anderen Ventilatoren arbeiten und dadurch einen Überdruck in der Nähe der Querschläge im Bereich des Portals erzeugen, da die Luft in der unfallfreien Röhre letztendlich in Richtung des resultierenden Gesamtschubs aller Strahlventilatoren strömt.

Folgende Anforderungen werden an die geplante Lüftungsanlage gestellt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- Hohe Redundanz, um eine volle Kapazität jederzeit verfügbar zu gewährleisten;

- die Lüftungsanlage wird überwacht und gesteuert durch das SCADA-System im LCC und kann jederzeit manuell bedient werden (und/oder kann – falls mit den zuständigen Behörden vereinbart – die Lüftungsanlage auch nach vordefinierten Lüftungsstrategien gemäß vorgegebenen Einsatzszenarien betrieben werden);
- die Überdruckregelung wirkt auch im Falle des Austretens von gasförmigen, chemischen Flüssigkeiten.

Es wird darauf hingewiesen, dass die operative Lüftungsstrategie vor Inbetriebnahme des Systems eine Zustimmung der für die Rettung zuständigen Behörden benötigen wird. Die Verfahren für die Aufstellung von definierten Einsatzszenarien und die damit verbundenen Lüftungs-Betriebsarten sind somit ordnungsgemäß während der fortschreitenden detaillierten Planung des Sicherheitskonzeptes und einer weiteren detaillierten Analyse der Einsatzszenarien fortzuschreiben und werden erst vor Abschluss der Ausführungsplanung abgeschlossen.

6.4.3.5 Lüftungsanlage, Druckregelung, Straßenröhren

Da die Fahrgäste in der Bahnröhre bei einem Brand in die angrenzende Straßenröhre evakuiert werden sollen, müssen die Grenzbedingungen für Druck und Geschwindigkeit der Luft in der Straßenröhre ebenfalls geprüft werden.

Unter normalen Betriebsbedingungen ist der Druck in der Straßenröhre weder zu hoch noch zu niedrig, da in jedem Abschnitt der Straßenröhre der vom Verkehr erzeugte Kolbeneffekt einen konstanten Luftstrom bewirkt, der durch den Reibungswiderstand der Wände ausgeglichen wird. Folglich existiert für die in der Straßenröhre erzeugten Drücke ein inhärenter Selbstaussgleichsmechanismus.

Wenn bei einem Unfall die östliche Straßenröhre als sicherer Bereich für die Fahrgäste in der Bahnröhre genutzt wird, veranlasst der zuständige Mitarbeiter in der LCC unverzüglich nach Meldung des Zugunglücks das Schließen beider Straßentunnel, sodass keine weiteren Fahrzeuge in die Straßenröhre einfahren (rotes Ampelsignal am Eingang). Abhängig vom Ort des Brandherds in der Bahnröhre wird in der östlichen Straßenröhre im Bereich des Unfallortes des inneren Fahrstreifens (Langsamfahrstreifen) geschlossen, die Geschwindigkeit auf dem äußeren Fahrstreifen (Überholstreifen) auf 50 km/h begrenzt und die Fahrzeugführer über Anzeigetafeln sowie UKW-Radio gewarnt.

Letztendlich geht der durch die Fahrzeuge erzeugte Kolbeneffekt bis auf Null zurück, sodass die Luftgeschwindigkeit über einen gewissen Zeitraum sinkt, bis wieder normaler Umgebungsdruck herrscht.

Dies erlaubt die allgemeine Schlussfolgerung, dass die Druck- und Geschwindigkeitsfelder in einer Straßenröhre im Vergleich zu einer Bahnröhre viel weniger kompliziert sind. Wie in den Bahnröhren sollten auch hier Strahlventilatoren aktiviert werden, um die induzierten Drücke und Geschwindigkeiten zu kontrollieren bzw. zu reduzieren.

6.4.4 Evakuierungsanalyse

Die Evakuierungsanalyse soll einerseits den Nachweis erbringen, dass die aus dem brennenden Zug zu evakuierende Population (insgesamt 588 Personen) in den benachbarten Bahn- und Straßenröhren Platz findet, und andererseits eine Schätzung der Gesamtdauer bis zum Erreichen eines „sicheren Bereichs“ durch die evakuierten Personen ermöglichen. Das Evakuierungsmodell wird hier nicht angewendet, um die sichere Evakuierungszeit aus einem brennenden Zug innerhalb einer Bahnröhre zu ermitteln. Es wird darauf hingewiesen, dass eine solche Analyse bereits im Zuge der Entwicklung des übergeordneten Sicherheitskonzepts für den Tunnel vorgenommen wurde (siehe Brandbekämpfungsstrategie RAT 6724-001).

Für das Evakuierungsmodell wurde das Programm PATHFINDER (erstellt von Thunderhead Engineering Consultants) verwendet. Pathfinder ist ein Notfallevakuierungssimulator, der eine 3D-Visualisierung der Ergebnisse ermöglicht. Pathfinder verwendet künstliche Intelligenz auf der Basis von Agenten (Softbots).

Jeder Zuginsasse in dem Modell verfügt über individuelle Charaktereigenschaften, Ziele und Wahrnehmungen. Dadurch wird ermöglicht, dass Gruppen von Insassen sich in natürlichen Strömungsmustern organisieren. Anstatt wie andere Programme die Insassen in einem Gitter oder als Partikel in einem Strömungsfeld darzustellen, bewegt Pathfinder die Insassen bei jedem Zeitschritt im kontinuierlichen dreidimensionalen Raum, in dem jeder Agent seine Umgebung untersucht und Handlungen auf der Grundlage eigener Bedingungen und Ziele vornimmt.

Das menschliche Verhalten als Faktor im Modell wird durch Interaktionen zwischen den Agenten in Bezug auf deren Geschwindigkeit und Strömungsverhalten bei der Bewegung durch die Bestandteile der Fluchtumgebung wiedergegeben.

Laut Thunderhead Engineering Consultants unterliegt Pathfinder einem ständigen Auswertungsprozess auf der Basis neuester Erkenntnisse aus der Erforschung von Bewegungsmustern. Um zu bestätigen, dass einzelne Elemente des Simulators ordnungsgemäß funktionieren, werden die Ergebnisse der Simulationen regelmäßig mit von Hand angestellten Berechnungen verglichen. Um das Gesamtverhalten des Simulators zu validieren, werden in Pathfinder wirkliche Evakuierungsszenarien rekonstruiert und die Ergebnisse mit Daten von unabhängigen Forschern verglichen. Darüber hinaus sollen Vergleiche mit anderen Evakuierungssimulatoren zeigen, wie die Leistungsfähigkeit von Pathfinder im Verhältnis zu Modellen mit anderem Aufbau ausfällt.

Die Evakuierungsanalyse setzt die Annahme voraus, dass die Notgehwege und Notausgänge frei zugänglich und verfügbar sind. Gemäß den anwendbaren Vorschriften der EBA-Tunnelrichtlinie und TSI SRT ist bei eingleisigen Tunneln nur ein Notgehweg vorzusehen. Der Tunnel der Festen Fehmarnbeltquerung verfügt hingegen in beiden Röhren beidseitig über je einen Notgehweg. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit einer kompletten Blockierung des Fluchtweges stark vermindert. Ebenso ist das Risiko, dass ein entgleisender Zug die Fluchtwege versperrt durch das beidseitige Entgleisungsschutzsystem (d. h. erhöhte Gehwege) in den Röhren signifikant reduziert.

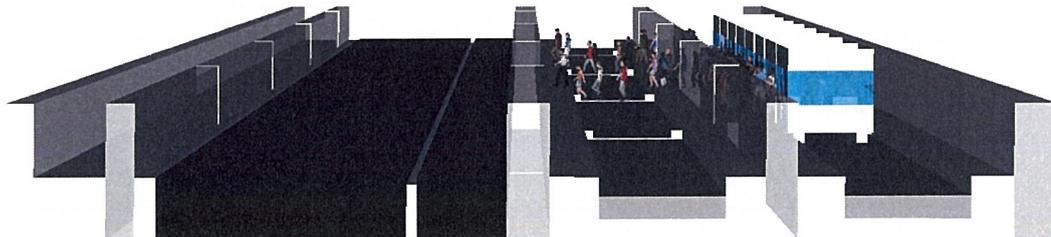
6.4.4.1 Geometrie und Eingaben im Evakuierungsmodell

In dem Evakuierungsmodell wurden die folgenden Parameter für Geometrie und Eingaben festgelegt:

- ein 500 m langer, repräsentativer Tunnelabschnitt aus zwei Bahnrohren
- eine Straßenröhre und die Zentralgalerie (Fluchtweg)
- Gleisüberquerungen, im Modell als zwei Stufen angelegt
- Fluchtwege mit Breiten von 1.175 mm und 1.325 mm in der äußeren (vom Unfall betroffenen) Bahnröhre sowie 1.125 mm und 1.375 mm in der inneren (unfallfreien) Bahnröhre (die aktuelle Version der Konstruktionszeichnungen sieht eine Breite von 1.380 mm für die westliche Seite der äußeren Bahnröhre und 1.130 mm für die östliche Seite der inneren Bahnröhre vor, d. h. etwas größerer Breiten als diejenigen, die für das Evakuierungsmodell gewählt wurden)
- Notausgangstüren mit einer Durchgangsbreite von 1.400 mm
- Breite der geöffneten Wagentüre von 1.200 mm
- Abstand von 550 mm zwischen Gleisoberkante und Fluchtweg – mit einer Stufe von 275 mm Höhe vor den Fluchtwegen
- Keine Hindernisse, die den Fluchtweg blockieren

Wie bei der CFD-Analyse handelt es sich bei der vom Unfall betroffenen Röhre um die äußere, östliche Bahnröhre (siehe **Abbildung 6-2**). Die Notausgangstüren (Querschläge) zwischen den Tunnelrohren sind sämtlich ganz geöffnet. Diese Wahl wurde getroffen, um die größtmöglichen Strömungswege für die Verbrennungsprodukte aus der Unfallröhre in die unfallfreie Röhre zu erhalten. Ein Ausschnitt der Geometrie ist in **Abbildung 6-22** dargestellt.

Abbildung 6-22: Geometrie des Evakuierungsmodells (Detail)

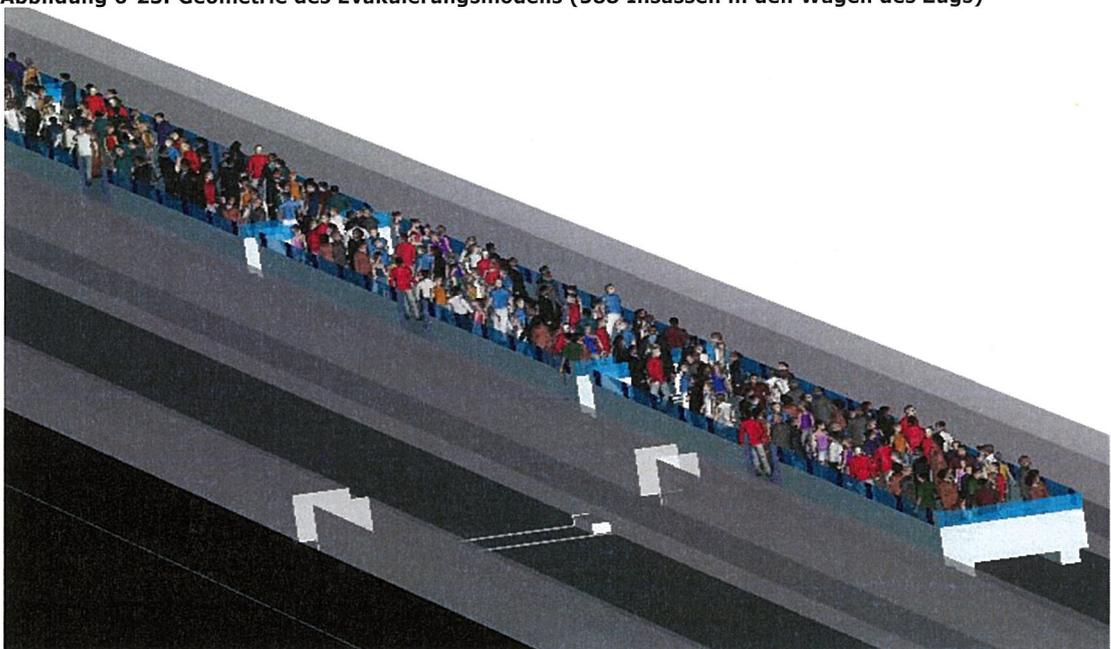


Der Brand wurde im hintersten Teil des letzten Wagens in einem Personenzug mit 8 Wagen (E-Triebwagenzüge, wie sie z. B. auf der Öresundquerung verkehren) festgelegt. Die Population des Zuges besteht aus 588 Personen (dies gilt als hohe Zugauslastung, stimmt aber mit den Ausgangsdaten für die vorangegangene Analyse überein). Die Insassen sind gleichmäßig auf die acht Wagen des Zugs verteilt (siehe **Abbildung 6-23**). Alle Türen zum Notgehweg in allen Wagen sind vollständig geöffnet, bis auf die Türen in unmittelbarer Nähe zu dem Brand im letzten Wagen, die für die Evakuierung als inaktiv gelten, da die Fluchtroute der Zuginsassen gemäß Annahme durch den benachbarten Wagen verläuft.

Die Evakuierung setzt ein, nachdem der Zug im Tunnel zum Stehen gekommen ist und die Insassen zum Verlassen des Zuges aufgefordert werden. Zu Beginn der Modelllaufzeit werden die Insassen aus dem Bereich des Brands im letzten Wagen evakuiert. Wie schon bei der vorangegangenen Evakuierungsanalyse wurde auch in diesem Modell eine Verzögerungszeit vor Einsetzen der Bewegung eingebaut. Sie betrug 15 s für die Insassen des vom Brand betroffenen Wagens und 30 s für die Insassen der anderen Wagen, d. h., während der ersten 0–15 s bleiben die Insassen in ihrem Wagen. Nach 15 s beginnen sie, sich aus dem Wagen fortzubewegen. Sie werden zum benachbarten Wagen und weiter zur Ausstiegstür des zweiten Wagens geleitet. Sie erreichen die Ausstiegstür des zweiten Wagens in ca. 30 s, zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Insassen dieses Wagens (und der anderen Wagen) in Bewegung setzen.

Die Analyse basiert auf der Annahme, dass nach der anfänglichen zeitlichen Verzögerung keine weitere Verzögerung bei der Evakuierung durch die Ausstiegstüren auftritt. Sollte es als notwendig erachtet werden, die Wagentüren für eine gewisse Zeit zu blockieren, um zu verhindern, dass die Insassen die benachbarte Tunnelröhre erreichen, bevor diese vom Verkehr befreit wurde, entspräche dies einer Erhöhung der Verzögerungszeit.

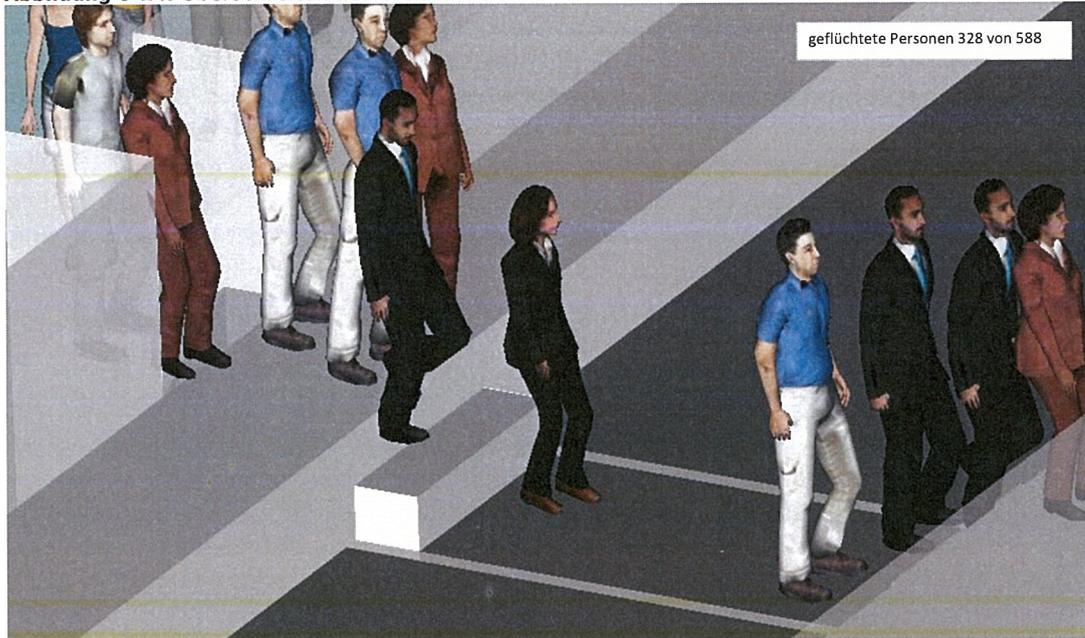
Abbildung 6-23: Geometrie des Evakuierungsmodells (588 Insassen in den Wagen des Zugs)



Für diese Analyse wurden zwei Fälle konstruiert:

In Fall 1 erhalten die Insassen die „Anweisung“, sich zur Straßenröhre zu begeben und dabei das Gleis in der benachbarten Bahnöhre auf den Übergängen zu überschreiten (siehe **Abbildung 6-24**).

Abbildung 6-24: Überschreiten des Gleises in Fall 1



In Fall 2 erhalten sie die „Anweisung“, sich in die benachbarte Bahnröhre zu begeben, jedoch ohne das Gleis zu überschreiten, da dort evtl. ein haltender Zug steht (siehe Kap. 3).

6.4.4.1.1

Populationsprofile für die beiden Fälle

Für jeden der beiden Fälle des Modells erfolgte die Analyse anhand der folgenden drei Varianten in der Zusammensetzung der Population (Agenten):

- Standard-Agentenprofil im Pathfinder-Programm (einheitliche Durchgangsbreiten);
- gemischte Population, zusammengesetzt aus je 50 % Frauen und Männern (einheitliche Durchgangsbreiten);
- gemischte Population, zusammengesetzt aus 50 % Männern, 40 % Frauen und 10 % Kindern bzw. Personen mit eingeschränkter Beweglichkeit (unterschiedliche Durchgangsbreiten).

Im Rahmen des Modells wurden folgende Strömungswerte und Bewegungsgeschwindigkeiten angewendet (Grundlage: experimentelle Daten nach NFPA-Standard 130):

Tabelle 6-4:

Eigenschaften des Agenten	Mindestgeschwindigkeit (m/s)	Durchschnittliche Geschwindigkeit (m/s)	Höchstgeschwindigkeit (m/s)
Mann	1,15	1,35	1,55
Frau	0,98	1,15	1,32
Person mit eingeschr. Beweglichkeit	0,77	0,9	1,04

6.4.4.2 Ergebnisse der Evakuierungsanalyse

6.4.4.2.1

Fall 1: Insassen begeben sich in die Straßenröhre

Für die „Standardpopulation“ (588 Insassen) betrug die Gesamtdauer der Evakuierung bis zum Erreichen der Straßenröhre 387 s.

Für die Populationsvariante „Männer, Frauen, Kinder/Personen mit eingeschränkter Beweglichkeit“ (588 Insassen) betrug die Gesamtdauer der Evakuierung bis zum Erreichen der Straßenröhre 422 s.

Für die Populationsvariante „Männer und Frauen“ (588 Insassen) betrug die Gesamtdauer der Evakuierung bis zum Erreichen der Straßenröhre 458 s.

6.4.4.2.2

Fall 2: Insassen begeben sich in die benachbarte Bahnöhre

Die Analyse zu Fall 2 kann verwendet werden, um eine Bedingung zu bewerten, bei der die nicht vom Unfall betroffene Röhre durch einen stehenden Zug blockiert ist. Die Breite des östlichen Fluchtwegs in der unfallfreien Bahnöhre beträgt 1.125 mm. Um die gesamte Population von 588 Personen auf dem Fluchtweg unterzubringen, wird eine Länge von 157 m benötigt (Annahme: jede Person belegt 0,3 m²).

Für die „Standardpopulation“ (588 Zuginsassen) betrug die Gesamtdauer der Evakuierung bis zum vollständigen Verlassen der Unfallröhre 387 s.

Für die Populationsvariante „Männer, Frauen, Kinder/Personen mit eingeschränkter Beweglichkeit“ (588 Insassen) betrug die Gesamtdauer bis zum vollständigen Verlassen der Unfallröhre 412 s.

Für die Populationsvariante „Männer und Frauen“ (588 Insassen) betrug die Gesamtdauer bis zum vollständigen Verlassen der Unfallröhre 448 s.

6.4.4.3

Schlussfolgerungen aus der Evakuierungsanalyse

In beiden Fällen stehen die Abweichungen in der Bewegungsgeschwindigkeit und der Durchgangsbreite im Verhältnis zu den unterschiedlichen Profilen der Insassengruppen. Diese Abweichungen führen bei dem Profil mit Männern, Frauen und Kindern/Personen mit eingeschränkter Beweglichkeit zu einem Ansteigen der Evakuierungsdauer um 35 s gegenüber der Standardpopulation. Ein weiterer Anstieg um 36 s ist bei dem Populationsprofil mit 50 % Männern und 50 % Frauen zu verzeichnen.

Der Anstieg der Evakuierungszeiten im Zusammenhang mit der Anwendung unterschiedlicher Populationsprofile beträgt insgesamt 70 s. Der beschwerlichste Fall ist derjenige, in dem die Population zu je 50 % aus Männern und Frauen besteht. Dies liegt an der Tatsache, dass in diesem Fall für alle Personen innerhalb des Profils eine einheitliche Durchgangsbreite angesetzt wurde, weshalb die Evakuierungszeit hier von der Strömungsmenge durch die Notausgangstüren bestimmt wird.

Der Unterschied in der Evakuierungszeit zwischen Fall 1 und 2 fällt gering aus und beträgt etwa 10 s bei allen Populationsprofilen. Der Hauptteil der Evakuierungszeit entfällt auf das

Verlassen der von dem Unfall betroffenen Tunnelröhre, einschließlich Verlassen des Zuges durch die Türen, Bewegung auf dem Fluchtweg neben dem Zug und Durchschreiten der Querschläge/Notausgänge. Die Evakuierungsstudien zeigen, dass die fliehenden Zuginsassen nur eine sehr geringe Menge an zusätzlicher Zeit aufwenden müssen, um in der unfallfreien Bahnöhre das Gleis zu überschreiten und den ausgewiesenen sicheren Bereich in der benachbarten Straßenöhre zu erreichen. Während der Flucht außerhalb der vom Unfall betroffenen Röhre sind die Personen keinen unverträglichen Bedingungen ausgesetzt.

- 6.4.4.4 Bedingungen in der benachbarten Straßenöhre während der Evakuierung
Da im Falle der Evakuierung eines Zuges die benachbarte Straßenöhre als sicherer Bereich ausgewiesen ist, ist es wichtig, dass der Straßenverkehr in dieser Tunnelröhre so gelenkt wird, dass von ihm keine Gefährdung für die fliehenden Zugfahrgäste auf dem Seitenstreifen ausgeht.

Im Fall eines Zugbrands in den Eisenbahnöhren werden die beiden Straßenöhren sofort für den Verkehr gesperrt. Wenn der Standort des gestoppten Zuges ungünstig liegt (d. h. in der Nähe des nördlichen Eingangsportals auf Lolland), kann die angrenzende Straßenöhre (Richtung DK) noch nicht vollständig verkehrsfrei sein, wenn die ersten flüchtenden Fahrgäste sich auf den Seitenstreifen der Straßenöhre begeben. Deshalb muss dort eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen ausgelöst werden:

Sicherheitsmaßnahmen:

- Der innere, normale Fahrstreifen wird für den Verkehr gesperrt;
- Auf dem äußeren Fahrstreifen der Straßenöhre wird die maximal zulässige Geschwindigkeit herabgesetzt; Warnungen an die Autofahrer werden über variable Textanzeiger und das Tunnelradio wiederholt ausgestrahlt;
- Wenn die CCTV-Videoüberwachung zeigt, dass potenzielle Konflikte zwischen den evakuierten Bahnreisenden auf dem Seitenstreifen und den vorbeifahrenden Fahrzeugen entstehen, können weitere Beschränkungen des Straßenverkehrs verhängt werden;
- Die Fahrgäste erhalten Anweisungen vor und während der Evakuierung vom Zugpersonal sowie über die Lautsprecheranlage in der Straßenöhre;
- Ein Ersteinsatzfahrzeug des Tunnelbetreibers wird umgehend zur Ereignisstelle beordert und die Fahrgäste werden vor Ort zusätzlich vom Betriebspersonal geschützt und angeleitet;
- Warnzeichen auf den Fluchttüren zum Straßentunnel weisen auf noch möglichen Straßenverkehr hin.

In Bezug auf die Rauchausbreitung wurde bereits im Rahmen der CFD-Analyse dokumentiert, dass auch mit einer passiven Lüftungsstrategie (ohne aktiven Einsatz des Lüftungssystems) kein Rauch aus der Ereignisöhre in die nicht betroffene Tunnelöhre in einer signifikanten Menge eindringen wird.

Doch wie bereits oben erwähnt, ist für die Feste Fehmarnbeltquerung entschieden worden, dass eine aktive Überdruckregelung umgesetzt werden soll, um jede Möglichkeit der Ausbreitung von Rauch aus der Ereignisöhre durch jede offene Fluchttür zu verhindern.

Das Belüftungssystem in den Straßen- und Bahnröhren ist ein Längslüftungssystem bestehend aus einer Reihe von Strahlventilatoren, die über die Länge der Röhren verteilt sind. Im Brandfall können die Strahlventilatoren so gesteuert werden, dass ein Überdruck in den nicht betroffenen Röhren gegenüber der Ereignisröhre erzeugt wird.

6.4.5 Allgemeine Schlussfolgerungen

Für die untersuchten Fälle können folgende allgemeine Schlussfolgerungen über die Bereiche außerhalb der von dem Brandunfall betroffenen Bahnröhre gezogen werden:

- Die Bedingungen erlauben das Überleben.
- Der Zugang für betroffene Personen ist sowohl mit als auch ohne Hilfe möglich.
- Es besteht Gelegenheit zur Selbstrettung. Behinderten oder anderen hilfsbedürftigen Personen wird durch das Zugpersonal und/oder Mitreisende geholfen.
- Betroffene Personen können, entsprechend den im Notfallplan geregelten Verfahren, auf die Rettung durch die Rettungsdienste warten.

Nach dem erprobten CFD-Modell werden keine Schleusen benötigt, um die Umweltbedingungen in den nicht vom Unfall betroffenen Tunnelröhren auf verträglichem Niveau zu halten.

6.5 Intervention durch Rettungsdienste

Es wird vorausgesetzt, dass der Zugang der Rettungsdienste zu dem brennenden Zug von den Straßenröhren aus erfolgt, die in beiden Richtungen für den normalen Verkehr gesperrt werden, sobald bei der LCC der Feueralarm von der TTCC eingeht. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Rettungskräfte am Einsatzort wird die Evakuierung der Zugfahrgäste in den sicheren Bereich in den meisten Fällen abgeschlossen sein. Deshalb sind keine Rettungszüge vorgesehen.

- Folgende Einrichtungen und Funktionen stehen den Rettungsdiensten zur Verfügung:

- Löschwassersystem mit Hydranten in den Tunnelröhren
- Lüftungssystem, das automatisch von SCADA gesteuert und vom zuständigen Mitarbeiter in der LCC manuell aktiviert und gesteuert werden kann
- TETRA/(BOS)- und GSM-R/GSM/ECS-Funkabdeckung in allen Tunnelröhren
- Bahnerdungsvorrichtungen (OLSP-Stationen)
- Stromanschlusssdosen (Elektranten) für den Betrieb von Lampen, Handwerkzeugen und anderem Rettungsgerät

7. Literaturverweise

[1] TSI SRT „Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich Sicherheit in Eisenbahntunneln im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im

- transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem“, Entscheidung 2008/163/EG der Kommission
- [2] CSM-RA, Durchführungsverordnung (EU) Nr. 402/2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken.
 - [3] EBA-Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“, Stand 1.7.2008
 - [4] Femern A/S, Memo „How to use traffic data“ Entwurf 15.11.2011.
 - [5] RAV Dokument RAV 511-007-1 „Timetable Technical Note“
 - [6] RAT Dokument RAT 6729-001-3 „Safety Facilities Report“
 - [7] RAT Dokument RAT 6724-001-0 „Fire Strategy Report“
 - [8] Femco Bericht Femco-M-Not0087 „Ventilation – Functional Description of System in Road, Rail and Gallery“
 - [9] Femco Bericht FEMCO-M-Rep0002 „Ventilation in Road Tunnel – Design Basis“
 - [10] Femco Bericht FEMCO-M-Rep0003 „Ventilation in Rail Tunnel – Design Basis“
 - [11] RAT 64233-002-6 „Operational Risk Analysis“, Juni 2014
 - [12] Workshops zur Gefahrenerkennung, Eisenbahn:
 - i. Workshop 1, Normaler Betrieb, Februar 2010.
 - ii. Workshop 2, Betrieb mit Alternativverfahren, 9. März 2010, (Veranstalter für 1 & 2: ATKINS)
 - iii. Workshop 3, Betrieb und Faktor Mensch, 7. November 2013, (Veranstalter: LSC und Abt. Eisenbahn)
 - [13] The METRO Project, Final Report. Research Report 2012:8.

Anlage 1

Grundsätzlicher Verfahrensablauf für Notfälle im Eisenbahntunnel

Verkehrsleitzentrale (TTCC) – Grundsätzlicher Verfahrensablauf für Notfälle im Eisenbahntunnel									
Unfall in der östlichen Bahnöhre									
Verfahrensablauf im Notfall, Schritte Zeit (geschätzt)	0	1	2	3	4	6	7	8	
	~ 30 s	0 ~ 30 s	30 – 40 s	40 – 60 s	60 – 80 s	80 – 150 s	150 – s		
Maßnahme, TTCC	Meldung von Lokomotivführer an TTCC: „Liegen gebliebener Personenzug in Brand“	a) Notbremsung aller Züge b) Elektronische Mitteilung „Zug in Bahnöhre in Brand“ an alle Rettungsdienste (Drücken 1 Taste)	a) Identifizieren und Bestätigen des blockierten Blockabschnitts mit Unfall	a) Aktivieren eines „Gefahrenpunkt“ auf der Signaltafel für den Blockabschnitt unmittelbar hinter dem Unfall-Blockabschnitt	a) Zug/Züge vor Unfallort (Erneute) Anweisung Höchstgeschwindigkeit 40 km/h	1) „Aktivierung Brückenkollision“: Anhalten aller Züge außerhalb der Bahnöhren	Stillstandskontrolle im Unfallabschnitt und Einleitung der Evakuierung	Evakuierungsanweisung für Passagiere durch den Lokomotivführer	Festlegen der Strecken für die Rückwärtsfahrt und Anweisung an haltende Züge hinter Unfallort zur Rückwärtsfahrt mit 40 km/h
Ergänzende Informationen	Man kann davon ausgehen, dass der TTCC zu diesem Zeitpunkt weiß, in welchem Blockabschnitt und an welchem Notausgang der Zug liegen geblieben ist. Der verunfallte Zug blockiert automatisch den Blockabschnitt, in dem er liegen geblieben ist.	a) Eine Notbremsung erfolgt mit höchster Bremskraft, um die Geschwindigkeit schnellstmöglich auf 40 km/h zu senken. b) LCC wird von den Rettungsdiensten informiert und leitet vordefiniertes Notfallszenario mit Lüftungsstrategie ein.	a) Nahender Zug stoppt automatisch mindestens einen Blockabschnitt vom Unfallort entfernt. Zug/Züge vor dem Unfallort verlassen den Tunnel mit normaler Geschwindigkeit (kein TTCC-Eingriffe erforderlich).	a) Ein sich dem Blockabschnitt mit dem Unfallort nähernder Zug wird automatisch angehalten, ehe er den eingestellten „Gefahrenpunkt“ erreicht. (Ein Personenzug mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h legt alle 30 s etwa 1,7 km zurück, der Bremsweg beträgt etwa 2 km. Die Zeit bis zum Stillstand eines Personenzugs beträgt 65 s.)	a) Die still stehenden Züge erhalten die Anweisung, ihre Fahrt mit 40 km/h fortzusetzen. Diese Anweisung geht an jeden Zug separat.	Frühestmöglicher Zeitpunkt, je nach Bremsdauer des sich nähernden Zuges.			Es wird eine zulässige Höchstgeschwindigkeit für die Rückwärtsfahrt von 40 km/h angenommen.

Legende:

