TECHNISCHE MITTEILUNG – ENTWURF

UNGÜLTIG!
Siehe Deckblatt!

Thema	**Sicherheit im Eisenbahntunnel - Risikoanalyse von Notfallszenarien – Abschlussbericht (Railway Tunnel Safety – Risk Analysis of Emergency Scenarios, Conclusive Report)**
Bereich	**Sicherheit**
ATR-Nr.	**RAI.08.0002**
TN-Nr.	**RAT 6729-321-3**
An:	**Johnny Restrup-Sørensen**
Von:	**Jørn Treldal**
Verteiler	**LBI, EHP, PTR, DEAD, DCKK, SKP, OPJ, TMRN, BIE**
Anhänge	**Anhang 1 Vergleich von CSM und Betriebsrisikoanalyse**

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
4.3.1 Rückholung des liegen gebliebenen Zuges mithilfe des nachfolgenden Zuges 6
4.3.2 Abschleppen des liegen gebliebenen Zuges aus dem Tunnel 7
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 Ausstieg der Fahrgäste 11
6.3.1 Einleitung 11
6.3.2 Methodik 12
6.3.3 CFD-Analyse 15
6.3.4 Evakuierungsanalyse 33
6.3.5 Allgemeine Schlussfolgerungen 39
6.4 Zugbetrieb im Brandfall für nicht betroffene Züge 40
6.4.1 Situation in der vom Unfall betroffenen Tunnelröhre 40
6.4.2 Situation in der unfallfreien Tunnelröhre 43
6.4.3 Schlussfolgerung 47
6.5 Intervention durch Rettungsdienste 47
7. Literaturverweise 48

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 mit einem mindestens gleichwertigen Sicherheitsniveau in Übereinstimmung mit der TSI SRT. Zum Nachweis der Sicherheit dieser Alternative wird ein technisches Gutachten eingeholt, wobei die Zustimmung der zuständigen nationalen Behörde erforderlich ist.

Für die Erbringung des Nachweises eines mindestens gleichwertigen Sicherheitsniveaus, d. h. der Erfüllung der Auflagen der TSI SRT [1], gelten die Vorschriften der CSM-RA [2].

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 oder zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen erfordern. Danach ist sicherzustellen, dass die Ergebnisse dieser Analyse im Entwurf umgesetzt werden, sodass ein vollständiges Sicherheitskonzept für den Tunnel vorgelegt werden kann, dass 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] („EBA-Tunnelrichtlinie" auch TuRiLi genannt) 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 Tunnel der Festen Fehmarnbeltquerung spielen die Straßenröhren jedoch eine wichtige Rolle bei Flucht- und Rettungsmaßnahmen. Dies ist 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 Basisfall B mit Fester Querung**
Personenzüge	40
Güterzüge	78

Die aktualisierte Version der Betriebsrisikoanalyse wurde mit diesen Werten ausgearbeitet.

Tabelle 3-1 zeigt die Anzahl an Zügen pro Tag. Es ist jedoch auch von Interesse, die maximale Anzahl an Züge 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" [5] (technische Mitteilung, Fahrplan). 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 3-2

Tabelle 3-2: Wahrscheinlichkeit für Züge in den Röhren

24 Stunden	Im Tunnel (min)	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 %

Aus Tabelle 3-2 geht hervor, 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. in 5% der Zeit werden die in Tabelle 3-2 genannten Wahrscheinlichkeiten nicht gelten.

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

Wie in Abschnitt 6.4 genauer dargelegt, gelten für den Bahnbetrieb im Tunnel bestimmte Einschränkungen:

- höchstens drei Züge gleichzeitig im Tunnel
- 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 3-2 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 beiden 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 Konzept wird dann auf diese Zugtypen beschränkt.

Personenzüge (alle gemäß Kategorie B nach TSI):

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.

Regionalzüge:

- E-Triebwagenzüge mit Wagen ähnlich dem Typ, der auf der Öresund-Querung 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.

Andere Personenzüge:

- E-Lokomotiven und Wagen. Kein Steuerwagen am Ende. Alle Kupplungen mit Standardpuffern und Zugeinrichtungen.
  Diese Konfiguration ist für internationale Nachtzüge typisch.

Güterzüge:

- 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.

1. Ein Zug hat keine ausreichende Traktion, um die Steigung aus dem Tunnel zu bewältigen. Mögliche Ursachen:
   - Überlastung der Bahnstromversorgung mit anschließendem Abfall der Fahrleitungsspannung und damit der Zugkraft von Triebfahrzeugen
   - Abfall der Traktionskraft aufgrund des Abschaltens von defekten Triebfahrzeugen

2. Ein Zug muss im Tunnel aufgrund eines Defekts anhalten, wodurch die Weiterfahrt des gesamten Zuges oder eines Teils des Zuges verhindert wird.

4.3 Vorschlag zur Rückholung von Zügen

Der Ansatz für die Rückholung eines Zuges hängt vom jeweiligen Zugtyp und der Rückholursache ab. Grundlegend 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*, 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

Dieses Verfahren ist komplizierter, da sich ein anderes Triebfahrzeug dem liegen gebliebenen Zug von vorne nähern muss, 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 werden muss, um zu verhindern, dass Personenzüge über längere Zeit in einer Tunnelröhre stecken bleiben.

Das ECTS-System wird eine unbedingte Notbremsfunktion (*unconditional emergency stop*) enthalten, die vom Stellwerkswärter 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 als zu lang eingeschätzt wird, kann das in Abschnitt 6.4 beschriebene Rückwärtsfahren eingeleitet werden.

Eine genaue Beschreibung der ETCS-Funktionen in anomalen Situationen ist Abschnitt 6.4 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 des Tunnelausgangs, 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") für den Tunnel der Festen Fehmarnbeltquerung wird das Risiko in der Anzahl der Todesfälle pro Jahr gemessen. Das Ziel ist ein Risiko, das höchstens genauso groß ist wie das Risiko für Reisende auf einer vergleichbaren Bahnstrecke in offenem Gelände. Auf dieser Basis wird ein Risikozielwert definiert und mittels Risikoanalyse im Rahmen des aktuellen Designs dokumentiert, dass das Gesamtrisiko der aktuellen Konzeptplanung unter dem Risikoziel liegt.

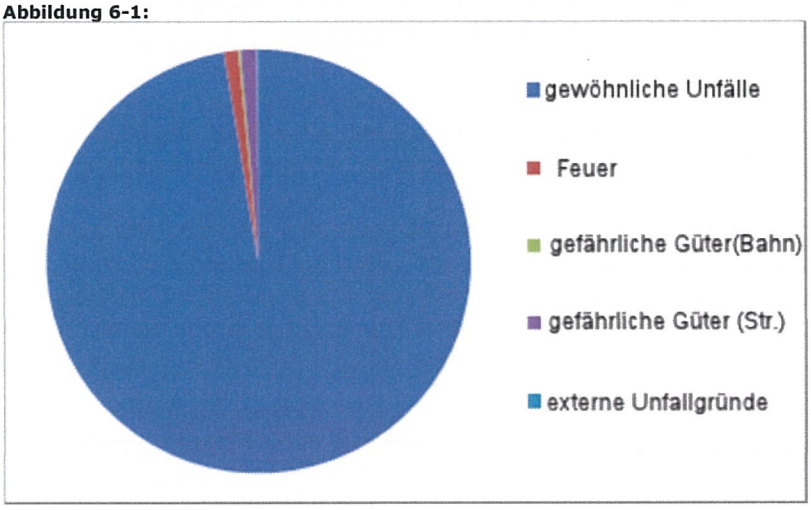
Die für die Erstellung der Risikoanalyse verwendete Methode basiert auf anerkannten Grundsätzen für die Durchführung von Risikoanalysen. Die Methode stimmt mit den in der CSM-Verordnung genannten Grundsätzen, wie sie in dem Diagramm in Anhang 1 dargestellt sind, voll und ganz überein. Ihre Gestaltung ist risikobasiert und nicht vorschreibend – deshalb wurde für die Risikoanalyse die Variante der expliziten Risikoabschätzung angewendet.

Das übergeordnete Risikobild unter Verwendung von Daten aus der Risikoanalyse ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 6-1

Art der Störung	Todesfälle/Jahr	Anteil am Gesamtrisiko in %	Wiederkehr-zeit in Jahren
Normale Bahnunfälle	$3{,}25 \cdot 10^{-3}$	97,4 %	310
Brand	$3{,}61 \cdot 10^{-5}$	1,08 %	27700
Gefahrgut – Bahn	$5{,}72 \cdot 10^{-6}$	0,17 %	175000
Gefahrgut – Straße	$4{,}09 \cdot 10^{-5}$	1,23 %	24400
Externe Störungen	$2{,}75 \cdot 10^{-6}$	0,08 %	364000
Gesamt	**$3{,}34 \cdot 10^{-3}$**	**100 %**	

Abbildung 6-1:



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 300 Jahren liegt.

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

Brände machen etwa 1 % des Risikos aus – bei einer Wiederkehrzeit von knapp 28.000 Jahren. 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 zu gering, um das Gesamtrisiko zu beeinflussen.

Das sehr geringe Risiko von Bränden (und anderen ernsten 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 Shinkanzen-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 viel dichteren Bahnverkehr als der Fehmarnbelttunnel wurden in den 12 Jahren seit Eröffnung der Öresundquerung keine Zugbrände oder Evakuierungen verzeichnet.

6.2 Vorbeugung

Im Tunnel wird eine Reihe von Funktionen und Systemen installiert, die einen Zugbrand im Inneren des Tunnels verhindern sollen.

- Das Risiko von Entgleisungen ist minimal, da es im Tunnel keine Weichen oder Kreuzungen gibt. Sollte dennoch ein Zug entgleisen, fungieren die Fluchtwege entlang der Gleise als „Leitplanken" und verhindern das Umstürzen des entgleisten Zuges.
  Zusätzlich wird vor den beiden Tunnelportalen ein Erkennungssystem für Entgleisungen installiert, das verhindern soll, dass ein bereits (teil)entgleister Zug in den Tunnel einfährt.
- Auch 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. 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.

6.3 Ausstieg der Fahrgäste

6.3.1 Einleitung

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 Abschnitt 4.2.2.6 TSI SRT muss ein sicherer Bereich folgende Voraussetzungen erfüllen:

1. Die Bedingungen erlauben das Überleben.
2. Der Zugang für Personen ist sowohl mit als auch ohne Hilfe möglich.
3. Personen sind zur Selbstrettung in der Lage oder können auf die Rettung durch die Rettungsdienste warten.
4. 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:

1. Schleusen sind konstruktionsbedingt nicht erforderlich und würden zudem für die Querschläge keine Vorteile bringen.
2. Die unfallfreie parallele Straßen- oder Bahnröhre stellt einen sicheren Bereich gemäß den Anforderungen von TSI SRT und EBA-Tunnelrichtlinie dar.

Im Folgenden wird diese Studie näher erläutert.

6.3.2 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 Tunneldesign 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.

6.3.2.1 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 Bahnröhren (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. 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 für alle 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. Für einen Güterzugbrand ist das Insassenrisiko signifikant kleiner, da sich nur

eine sehr begrenzte Anzahl Personen in der Unfallröhre aufhalten. Darüber hinaus sind diese Personen ausgebildet, sodass sie genau wissen, wie sie sich im Brandfall zu verhalten haben.

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

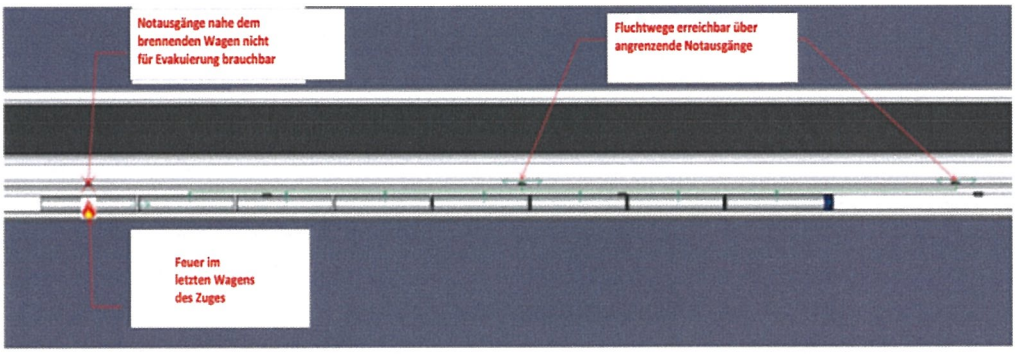
- Ein Zugbrand, bei der die Höchstanzahl von 588 Personen, d.h. ein voll besetzter Personenzug, betroffen ist. Andere Szenarien gehen von einer geringeren Zugbelegung aus, was eher die Regel sein dürfte (95 bzw. 200 Insassen bei Personenzugunfällen sowie 2 Mitarbeiter bei einem Brand in einem Güterzug). Damit wurde von der maximalen Zeitspanne für die Evakuierung der vom Unfall betroffenen Tunnelröhre sowie von der höchstmöglichen Anzahl der vom Worst-Case-Szenario betroffenen Personen ausgegangen;
- Beim Eintritt dieses Worst-Case-Szenario ist dann die maximale Anzahl von 38 Todesfälle in der vom Unfall betroffenen Unfallröhre ermittelt worden.
- Mit 300 s wurde die kürzeste und konservativste ASET*(Available Safe Egress Time;* verfügbare sichere Fluchtzeit) bzw. Zeitspanne, bis zur unverträglichen Bedingungen in der Unfallröhre, angenommen, was der ursprünglichen Analyse, die Teil der Brandbekämpfungsstrategie war, entspricht;
- Wie oben erwähnt, könnte gemäß ursprünglicher ASET/RSET-Analyse, welche im Rahmen der Brandbekämpfungsstrategie für die Eisenbahntunnelröhren verwendet wurde, bei einem Unfall mit einem Güterzug das schlimmstmögliche und sich schnell ausbreitende Brandszenario in den Unfallröhren potenziell zu Bedingungen führen, in denen kein Überleben der Personen (2 Mitglieder des Zugpersonals) möglich ist, falls sie den Unfallort nicht unmittelbar verlassen können. Die Berücksichtigung dieses Szenarios würde die Analyse von Bedingungen in anderen Tunnelröhren zur Bestimmung von deren Eignung als „sicherer Bereich" irrelevant machen. Außerdem wird im Rahmen der Betriebsstrategie davon ausgegangen, dass sich bei einem Brand, der einen Gefahrengütertransport durch den Tunnel betrifft, kein Personenzug in der Unfallröhre befindet.

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: Größter anzunehmender Unfall**

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 *(Available Safe Egress Time;* verfügbare Fluchtzeit) und RSET *(Required Safe Egress Time;* 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 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 Passagiere (38) als Todesfälle einzustufen sind. Wie bereits erwähnt, ist es anzunehmen dass den sicheren Bereich für diese Personen keine Verbesserung der Gesamtsituation darstellt, wohl aber für die verbleibenden Passagiere, denen die Selbstrettung aus dem Bereich, in dem unverträgliche Bedingungen herrschen, gelingt.

Abbildung 6-2: Größter anzunehmender Unfall



6.3.2.2 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. 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 im Abschnitt 6.3.3 CDF-Analyse beschrieben.

Das zweite Untersuchungsgebiet besteht in einer computergestützten Evakuierungsanalyse, mit der die Zeit gemessen wird, die 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 Bahnröhre benötigen, ohne dort das Gleis zu überschreiten, bewertet. Dabei wird angenommen, dass die evakuierten Personen auf dem östlichen Notgehwegweg verbleiben, weil die Schienen aus irgendeinem Grund nicht überquert werden können. Auch hier stehen nicht die Evakuierungszeit aus dem Zug oder innerhalb der vom Brand betroffenen Tunnelröhre im Mittelpunkt, sondern die Bewegungen außerhalb dieser Röhre.

6.3.3 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 die Übertragung von Rauch und Wärme bei Bränden liegt. Hauptziel 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.

6.3.3.1 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.

Im Modell wurde ein 1.040 m langer, repräsentativer Tunnelabschnitt angelegt, der zwei Bahnröhren, eine Straßenröhre und die Zentralgalerie (Fluchtweg) des Tunnels umfasst. Querschnitte des Modells, in denen alle Tunnelröhren zu sehen sind, sind in **Abbildung 6-3: Tunnelquerschnitt für die CFD-Modellgeometrie**
und **Abbildung 6-4: CFD-Modellgeometrie**
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.

Abbildung 6-3: Tunnelquerschnitt für die CFD-Modellgeometrie

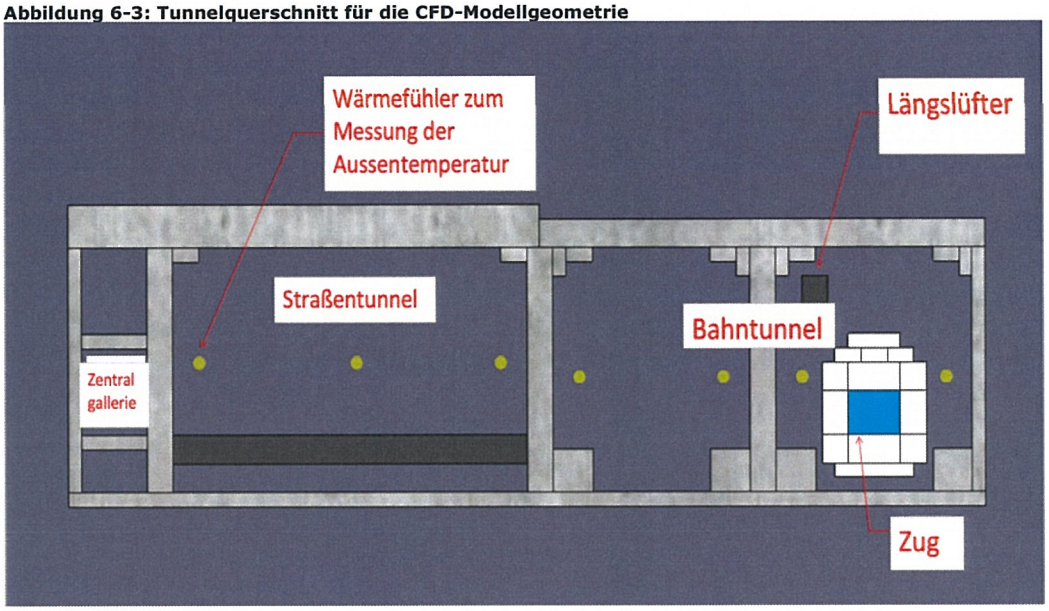
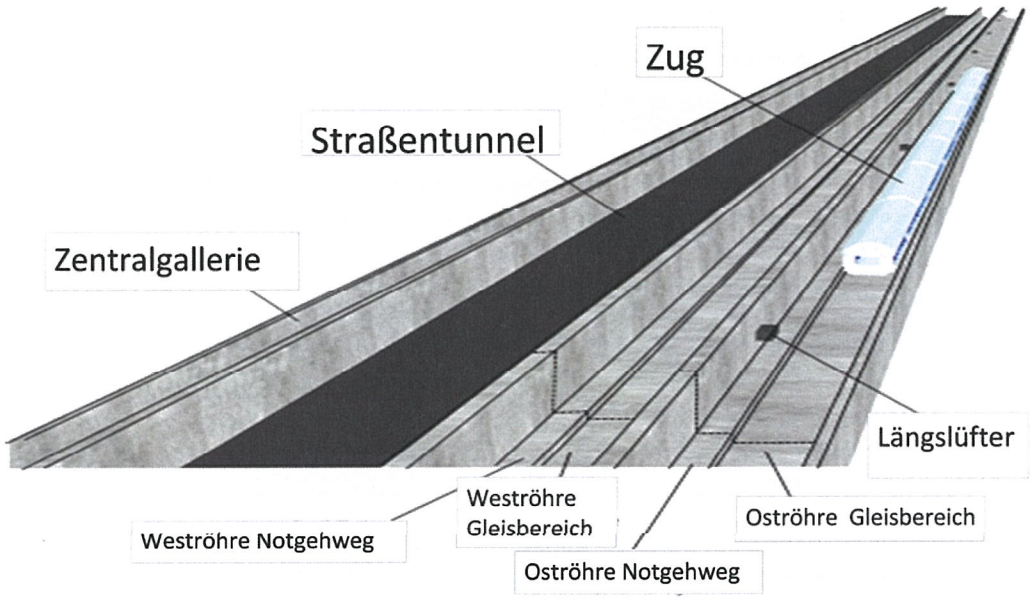


Abbildung 6-4: CFD-Modellgeometrie

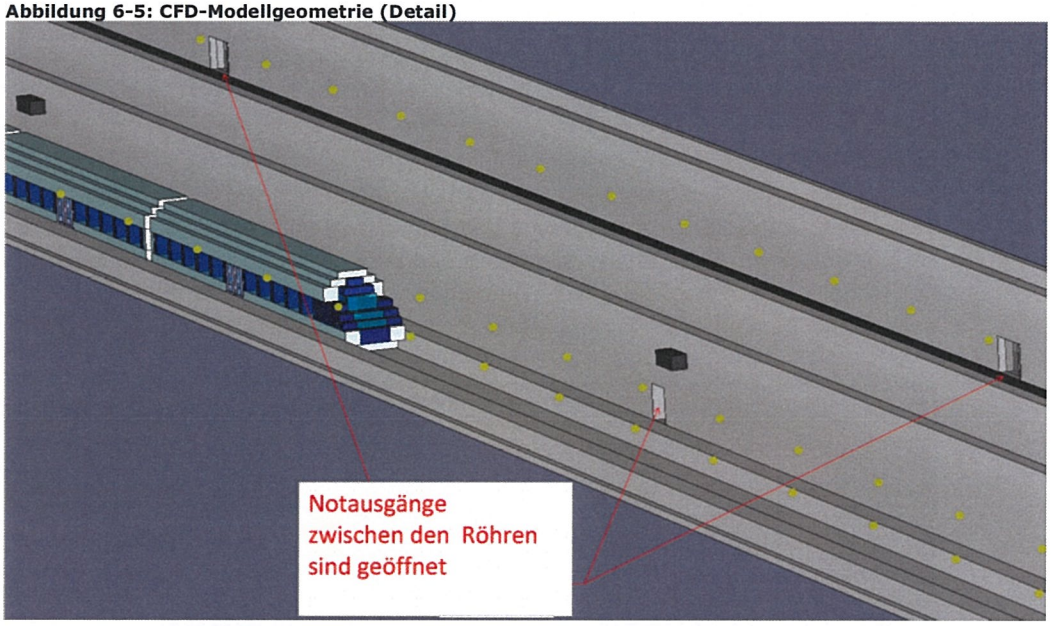


Bei der von dem Brand betroffenen Röhre handelt es sich um die äußere (östliche) Bahntunnelröhre, die auf den Abbildungen ganz rechts dargestellt ist.

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: CFD-Modellgeometrie (Detail)** 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.

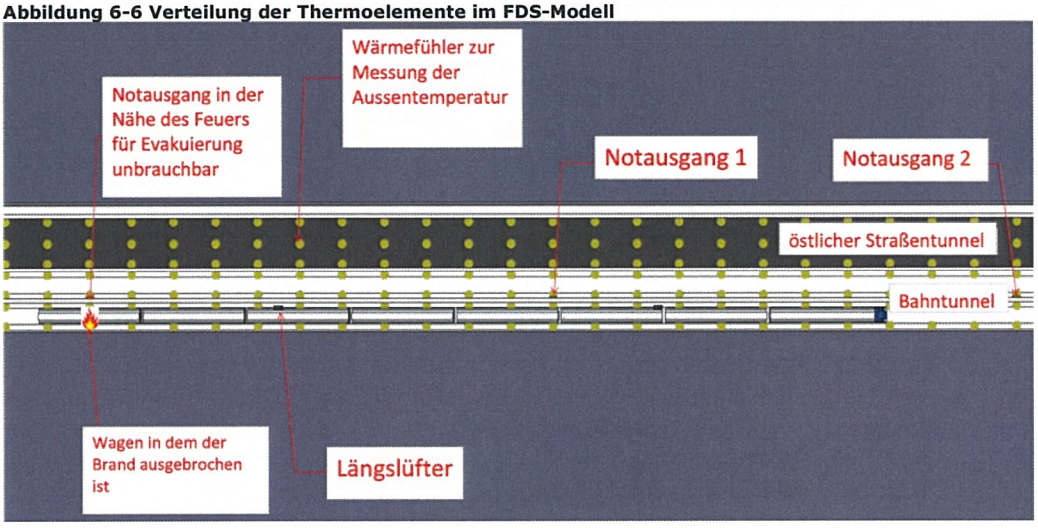
Zur Eruierung des schlimmstmöglichen Szenarios für die Analyse des „sicheren Bereichs" wurden verschiedene Entzündungsorte für den Brand in Betracht gezogen. Wie bereits erwähnt, wird der Brand eines Güterzugs nicht als realistisches Brandszenario für die Analyse der benachbarten Straßen- und Bahntunnelröhren als „sicherer Bereich" erachtet. Der Ausbruch eines Brandes im Personenzug wurde im letzten Wagen angelegt, da dessen Insassen die längste Strecke zu einem Ausgang zurückzulegen haben, was wiederum eine sehr konservative Annahme darstellt, zumal die Wahrscheinlichkeit eines lebensbedrohlichen Feuers aufgrund der zuvor publizierten europäischen statistischen Daten sehr gering ist. 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 die Passagiere 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: Größter anzunehmender Unfall**

.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.

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: Tunnelquerschnitt für die CFD-Modellgeometrie 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

Der aktive Einsatz der in der Straßen-und Bahnröhre vorhandenen Längslüfter zum Aufbau eines Überdruckes in den nicht von Brand betroffenen Röhren wurde bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Zweck der zweiten Variante ist 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 während 5 Minuten (300 s) von 3 m/s auf 0 m/s zurück. Nach 300 s weisen beide Tunnelröhren im Modell denselben Luftdruck auf (ohne Berücksichtigung des feuerindizierten Luftdrucks in der Unfallröhre). Dieses Szenario wurde als wahrscheinlich erachtet unter Berücksichtigung des vorgesehenen Zugfahrplans und des Verkehrsaufkommens im Tunnel wie auch im Hinblick auf die Signal- und Halteprozeduren.

Der im Modell simulierte Brand hat dieselben Parameter wie in den vorherigen Untersuchungen; diese sind in **Abbildung 6-8: Brandkurve im Modellversuch** dargestellt. Simuliert wird ein Brand mit schneller Ausbreitung, der nach 650 s einen maximalen Wärmeausstoß von 20 MW erreicht. 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 und die Entstehungsbrand- und Flashover-Phasen sofort einsetzen.
Es ist zudem nicht möglich, die Dauer der Entzündungsphase genau zu bestimmen **(siehe Abbildung 6-7: Darstellung der Brandausbreitung mit Faktor t2** , 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 im *CIBSE Guide E Fire Engineering*, 2010). Deshalb wird für den simulierten Brand in der CFD-Analyse angenommen, dass er sich bei t=0 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

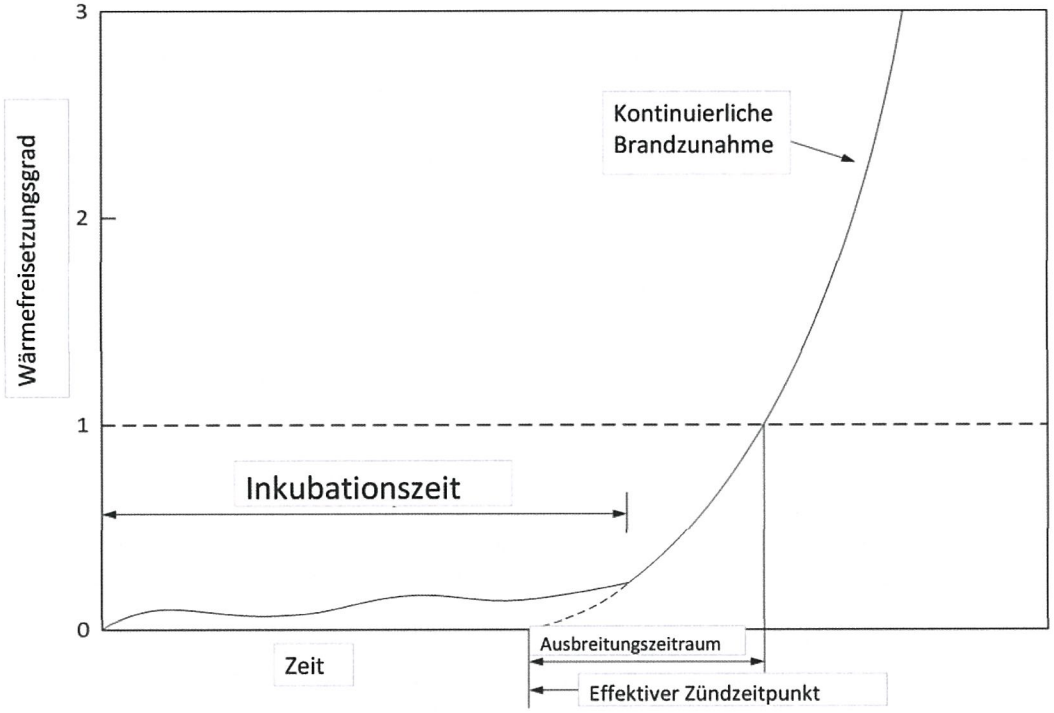
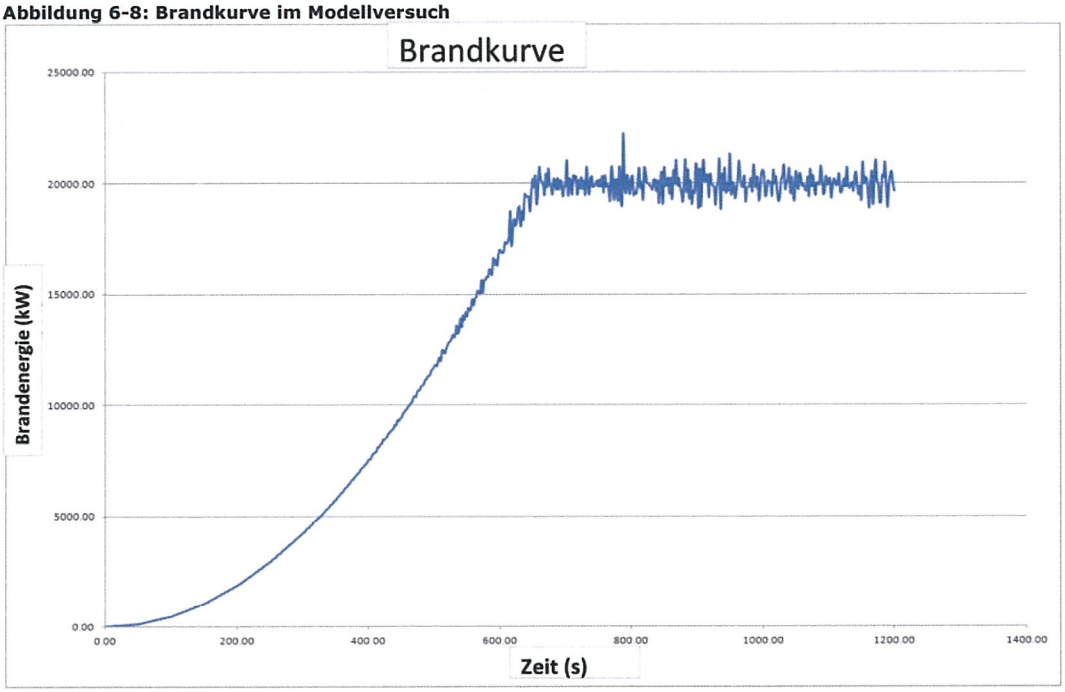


Abbildung 6-8: Brandkurve im Modellversuch



Diese Brandentwicklung wird als repräsentativ für den Zeitpunkt des Flashovers im Eisenbahnwagen erachtet. 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 h, bis die Vollbrandphase erreicht wurde). Für die vorliegende Analyse wurde im Interesse der Belastbarkeit 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.

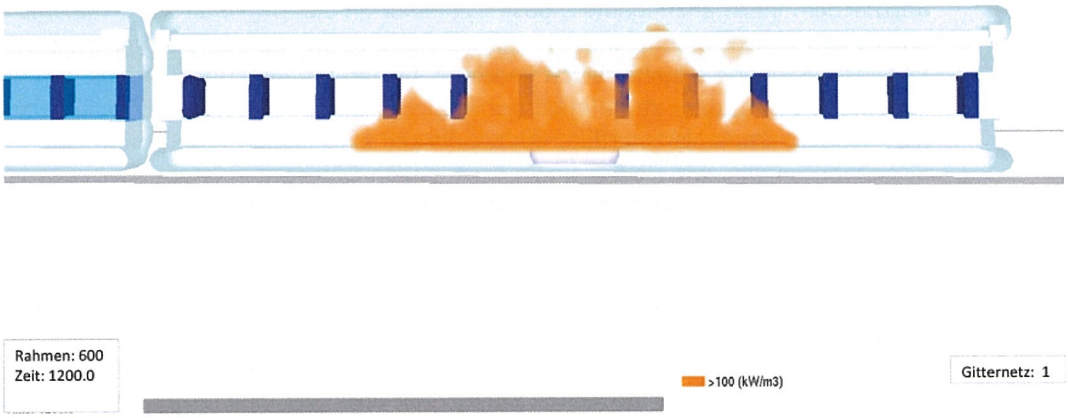
Eine Verlängerung der Brandausbreitungsphase (bis zu dem Punkt, an dem die Bedingungen stabil sind) ist realistisch, wenn keine Löschmaßnahmen eingeleitet werden. In diesem Fall wird der Brand im Extremfall während 10 bis 30 Minuten wachsen, bis er 30–50 MW oder mehr erreicht. Dies gilt indes nur, wenn 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. RAT ist sich dessen 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. Feuerdynamiksimulator), 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 Raucheigenschaften 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 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/m^3)
c_p = Spezifische Wärme (kJ/kg · K)
T_∞ = Umgebungstemperatur (K)
G = Schwerkraft (m/s^2)

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 Rauchbewegung 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

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.

6.3.3.2 CFD-Ergebnisse

6.3.3.2.1 Modell 1: Keine Luftbewegung in den Tunnelröhren

Die Ergebnisse für Modell 1 der Modelluntersuchung werden nachfolgend dargestellt.

Die in Abbildung 6-10 und

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

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 6.3.4.2).

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

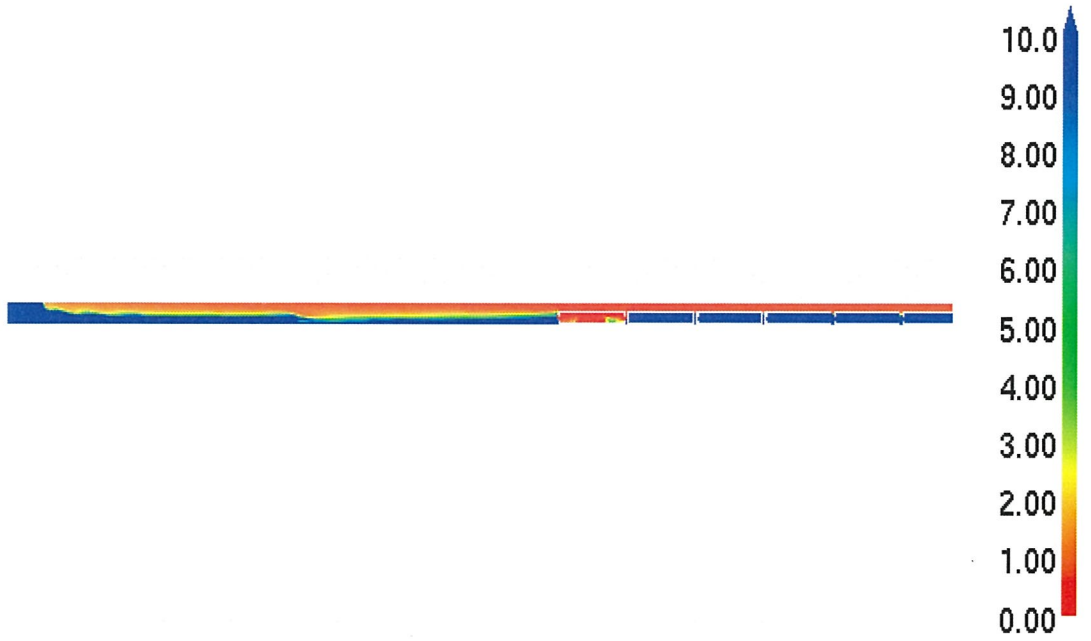


Abbildung 6-11: Modell 1, Temperatur (°C), Längsschnitt durch den Brand nach 378 s

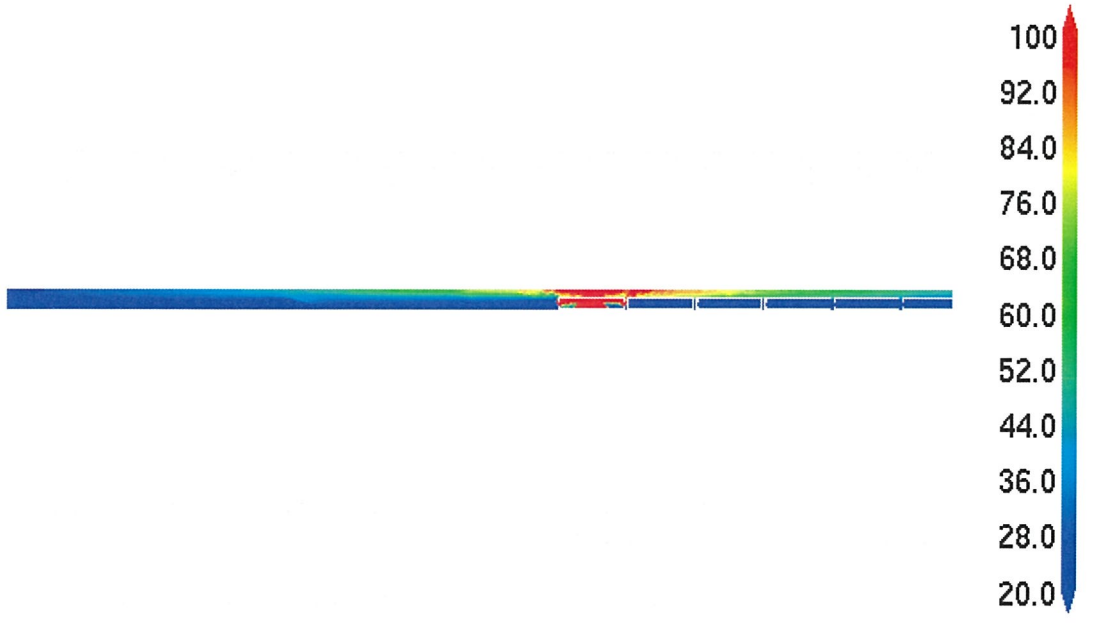


Abbildung 6-12: Modell 1, Sicht (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 378 s

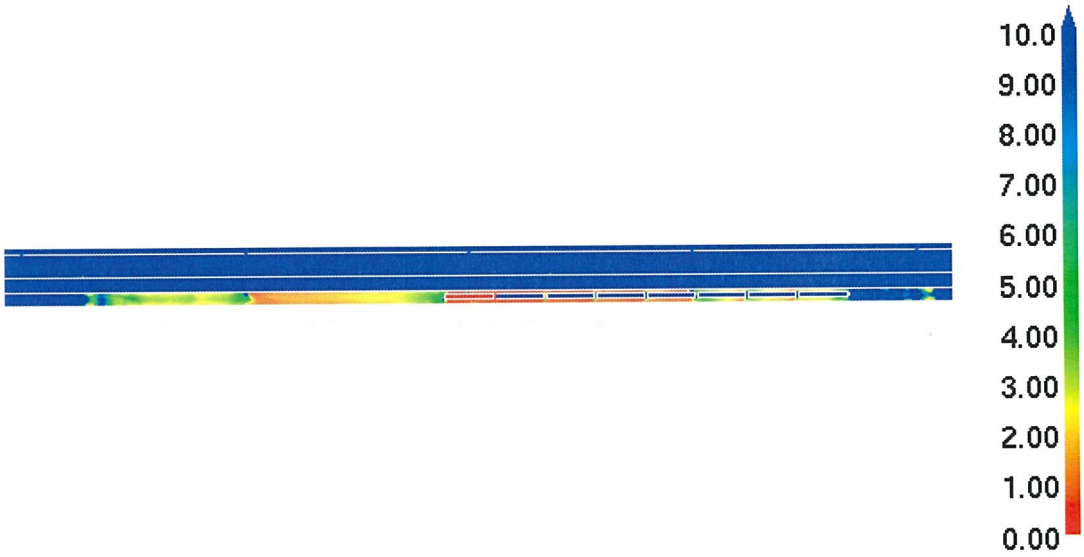


Abbildung 6-13: Modell 1, Temperatur (°C) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 300 s

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 Rauchschicht vor dem Zug in Abbildung 6-14: Modell 1, Sicht (m), Längsschnitt nach 522 s

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 Unfallröhre in beiden Richtungen des Tunnels (und erreicht das in Fahrtrichtung gelegene Ende des simulierten Modellbauwerks 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

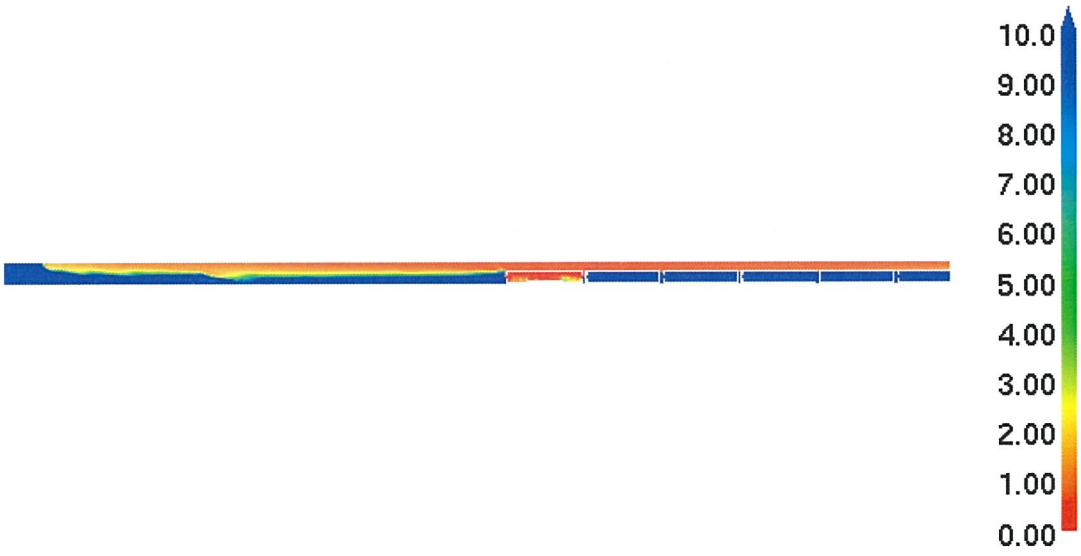
Die Luftzufuhr stört die Rauchschicht und zieht sie örtlich herunter, wobei dieser Effekt erst nach ca. 500 s eintritt. Ein solcher Zustrom von Luft kann im wirklichen Tunnel zwar vorkommen, ist im Modell aber im Verhältnis zur Realität wahrscheinlich übertrieben. Dies liegt daran, dass nur ein Teil 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 6-15: Modell 1, Sicht (m), Querschnitt mit Verbindungstür/Querschlag nach 378 s~1200 s

6.3.3.2.2 Modell 2: Induzierte Luftbewegung in der unfallfreien Bahnröhre

Die Ergebnisse im 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, Sichtverhältnisse (m), Längsschnitt nach 378 s (nach Abschluss der Selbstrettung)



Ein weiterer merkbarer Unterschied zwischen Modell 1 und Modell 2 ist ein kurzer Zeitabschnitt (ca. 80~100 s), in dem eine geringe Menge Rauch aus der Unfallröhre in die unfallfreie Bahnröhre 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 Bahnröhre 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 Bahnröhre hinein ist auch in Abbildung 6-19 und Abbildung 6-20 dargestellt und zwar 710 s nach Brandbeginn.

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

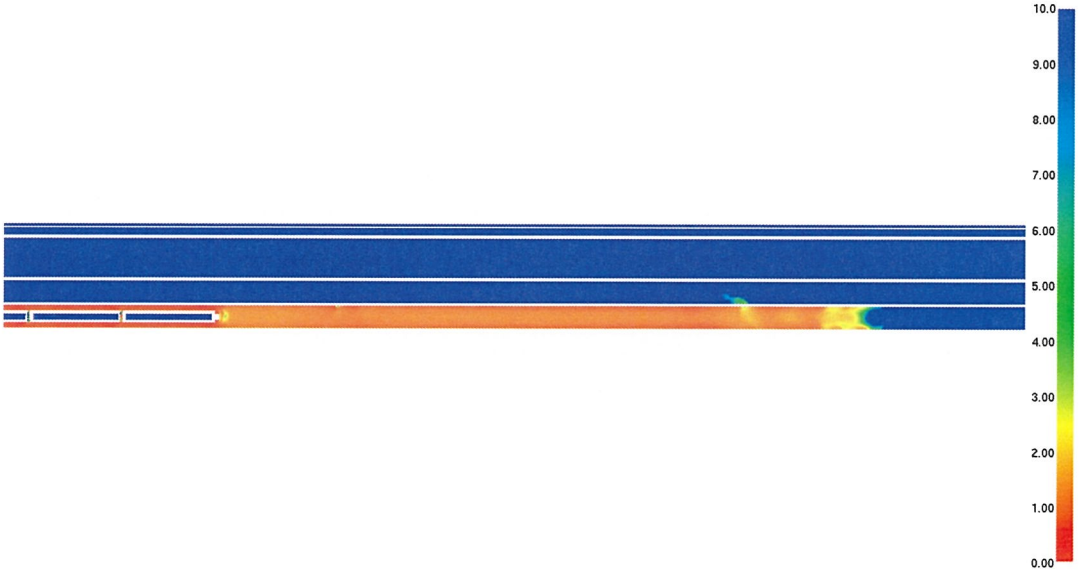


Abbildung 6-18: Modell 2, Sichtverhältnisse (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 680 s

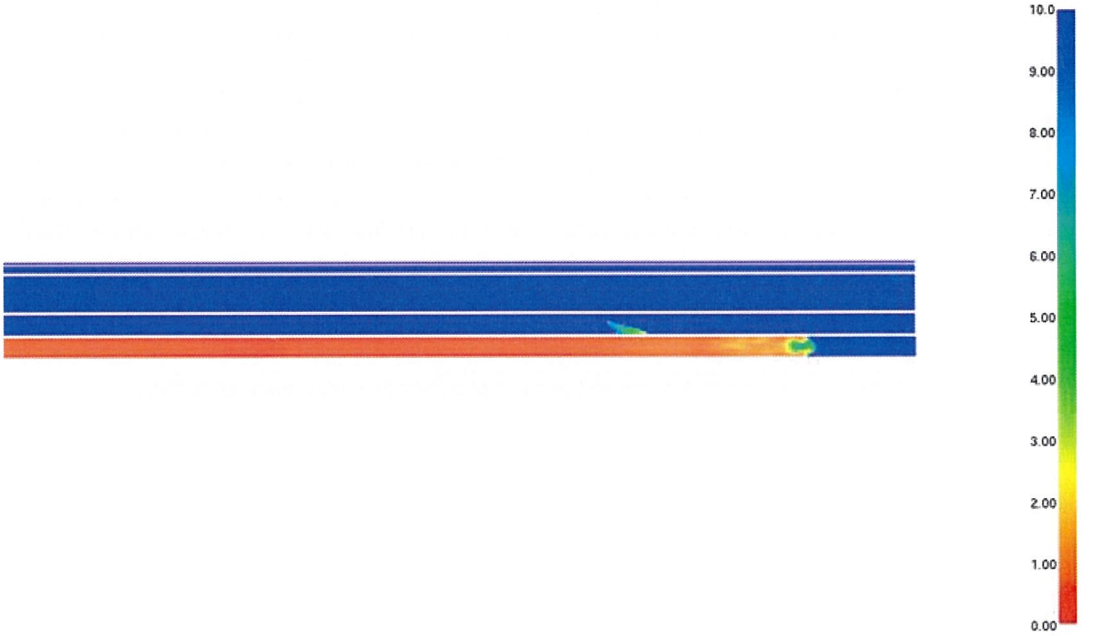


Abbildung 6-19: Modell 2, Sichtverhältnisse (m) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 710 s

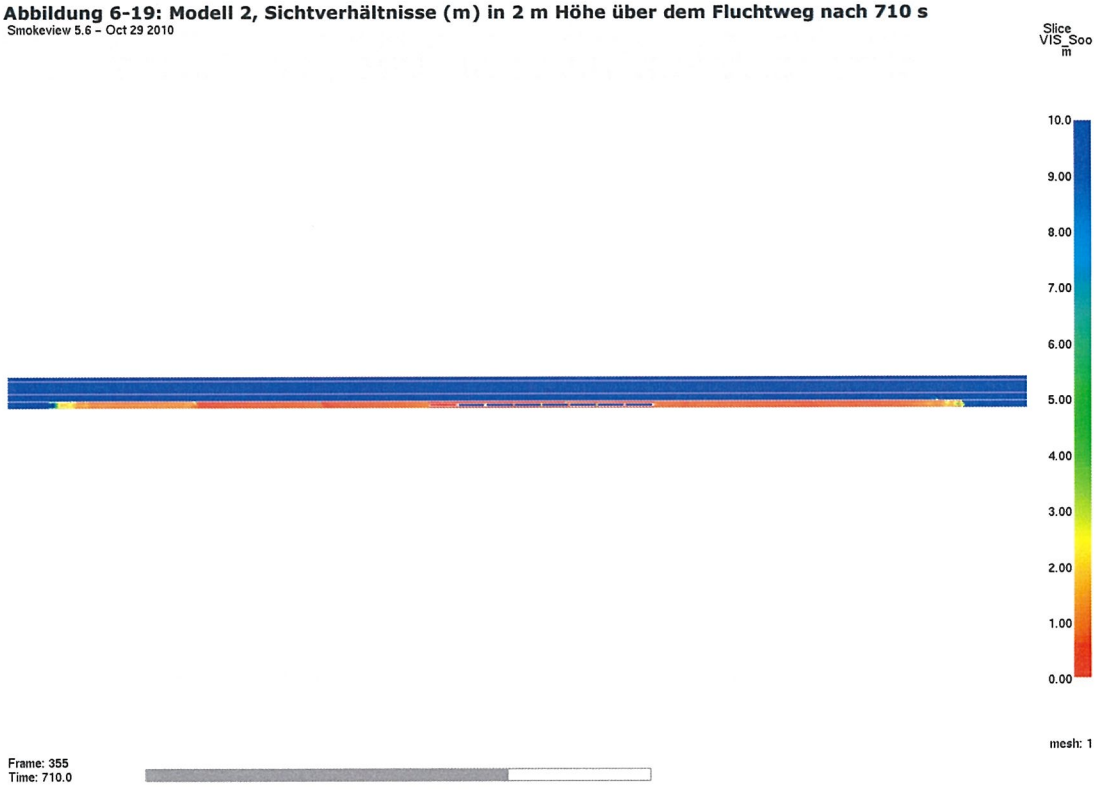
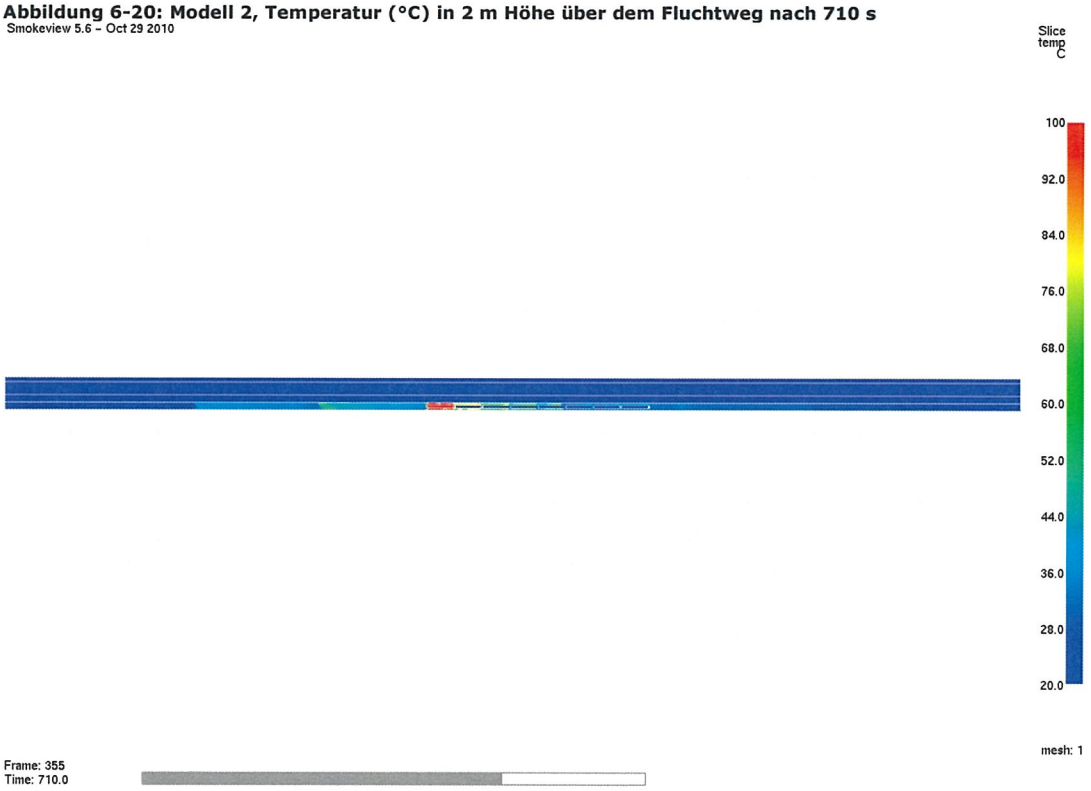


Abbildung 6-20: Modell 2, Temperatur (°C) in 2 m Höhe über dem Fluchtweg nach 710 s



6.3.3.3 Schlussfolgerungen aus der CFD-Analyse

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

In Modell 2 strömt Rauch in die unfallfreie Bahnröhre, wenn auch nur über einen kurzen Zeitraum von max. 100 s. 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 wären. Dies resultiert in einer gewissen Menge an Rauchgasen, die in die unfallfreie Tunnelröhre überströmen, dort jedoch schnell verdünnt und verträglich werden, 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 Bahnröhre nachgewiesen ist.

Die Ergebnisse dieser CFD-Studie stimmen mit früheren Untersuchungen überein, durch die in der von dem Unfall betroffenen Tunnelröhre 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.

6.3.3.4 Lüftungsanlage Druckregelung

Um sicherzustellen, dass das Eindringen von Rauch in die nicht betroffene Tunnelröhre verhindert wird, wird eine Überdruck-Regelung im Notfall aktiviert. 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 Tunnelröhre, um dort eine ausreichende Druckerhöhung zu kontrollieren, d.h. die Bereitstellung eines Überdrucks gegenüber dem Druck in der Ereignisröhre.

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

Die geplante Anordnung des Längslüfter-Systems mit bidirektionalen Jet Lüftern auf der ganzen Länge der einzelnen Tunnelröhren verteilt, bietet ein hohes Maß an Flexibilität sowohl in Bezug auf die Luftströmungsregelung als auch die Druckregelung in den Tunnelröhren.

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, - falls mit den zuständigen Behörden vereinbart-, kann die Lüftungsanlage auch nach vordefinierten Lüftungsstrategien gemäß vorgegebenen Einsatzszenarien betrieben werden);
- die Überdruckregelung wirkt auch im Falle des Austretens von gasförmigen, chemischen Flüssigkeiten.

Eine funktionale Beschreibung der Lüftungsanlage der Straße, der Schiene und der Zentralgalerie ist im Femco Bericht, " Ventilation-Functional Description of System in Road, Rail and Gallery [8]" beschrieben. Ferner definieren die Femco Kapazitäts Analysen: Ventilation in Road Tunnel – Design Basis [9] and Ventilation in Rail Tunnel – Design Basis[10] den Umfang der System-Leistung, aus der die Anforderungen an das detaillierte System-Design abgeleitet werden.

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 detaillierte

Planung des Sicherheitskonzeptes und einer weiteren detaillierten Analyse der Einsatzszenarien fortzuschreiben. Die Analysen der Einsatzszenarien sind daher eng an diesem Prozess ausgerichtet und werden vor Abschluss der detaillierten Planungsphase abgeschlossen sein.

6.3.4 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.

6.3.4.1 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 Bahnröhren
- eine Straßenröhre und die Zentralgalerie (Fluchtweg)
- Gleisüberquerungen, im Modell als zwei Stufen angelegt
- Fluchtwege mit Breiten von 1175 mm und 1325 mm in der äußeren (vom Unfall betroffenen) Bahnröhre sowie 1125 mm und 1375 mm in der inneren (unfallfreien) Bahnröhre
- Notausgangstüren mit einer Durchgangsbreite von 1400 mm
- Breite der geöffneten Wagentüre von 1200 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: Größter anzunehmender Unfall

Die Notausgangstüren (Querschläge) zwischen den Tunnelröhren 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 6-21: Geometrie des Evakuierungsmodells (Detail) dargestellt.

Abbildung 6-21: 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 Zuges verteilt (siehe Abbildung 6-22: Geometrie des Evakuierungsmodells (588 Insassen in den Wagen des Zuges)
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 Evakuierungsanalyse setzt ein, nachdem der Zug im Tunnel zum Stehen gekommen ist und die Insassen durch das Zugpersonal 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 verbleiben die Insassen in ihrem Wagen. Nach 15 s beginnen sie sich aus dem Wagen fortzubewegen. Sie werden zum benachbarten Wagen und weiter zur Ausstiegstüre des zweiten Wagens geleitet. Sie erreichen die Ausstiegstüre 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.

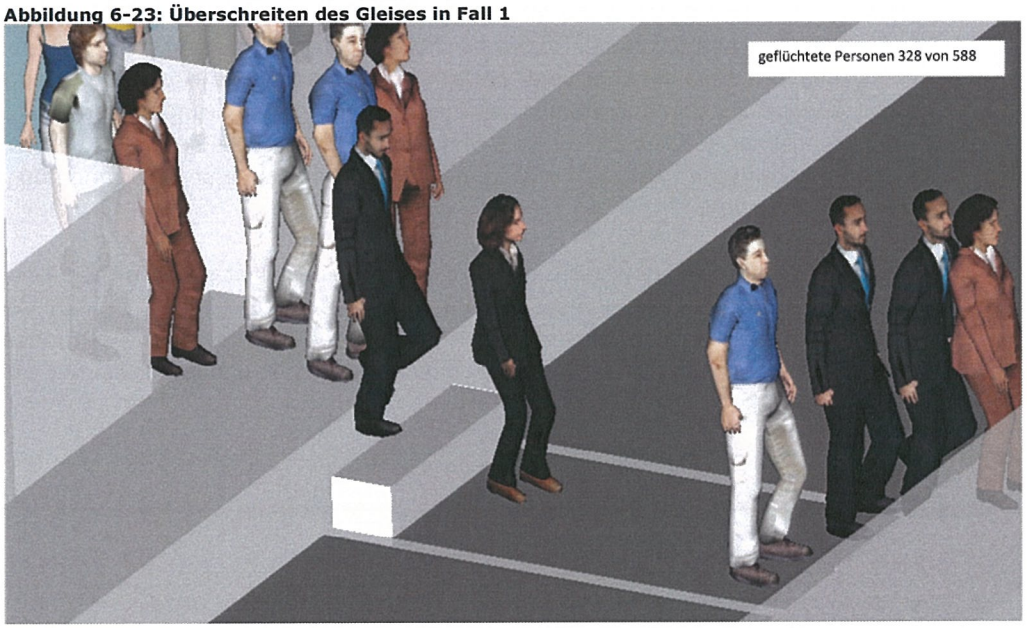
Wie in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, dürfen Personenzüge in der anderen Tunnelröhre, die sich in einem Abstand von weniger als 5,4 km vom brennenden Zug befinden, nicht anhalten, sondern müssen weiterfahren. Es dauert ca. 100 s, bis ein solcher Zug den brennenden Zug passiert hat; also vergleichbar mit der Mindestzeit, die von den Insassen des verunfallten Zugs benötigt wird, um zur benachbarten Tunnelröhre zu gelangen, wo sie möglicherweise auf den durchfahrenden Zug treffen. Auf der Grundlage der Evakuierungsanalyse lässt sich diese Zeitspanne auf ca. 45 s ansetzen. Mit anderen Worten: In diesem spezifischen Szenario müssten die Ausstiegstüren erst nach rund 100 - 45 = 55 s freigegeben werden.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Wahrscheinlichkeit einer solchen Reihe gleichzeitig auftretender Ereignisse wie oben beschrieben (Zugbrand, bei dem der Zug nicht in Lage ist, weiterzufahren, derweil der sich nähernde Zug in der anderen Tunnelröhre genau 5,4 km vom Unfallort entfernt ist) äußerst gering ist und daher ein nur sehr kleines Element im Gesamtrisikokonzept darstellt.

Abbildung 6-22: Geometrie des Evakuierungsmodells (588 Insassen in den Wagen des Zuges)

In Fall 1 erhalten die Insassen die „Anweisung", sich zur Straßenröhre zu begeben und dabei das Gleis in der benachbarten Bahnröhre auf den Übergängen zu überschreiten **(siehe Abbildung 6-23: Überschreiten des Gleises in Fall 1).**

Abbildung 6-23: 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.).

6.3.4.1.1 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 6-2

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 eingschr. Beweglichkeit	0,77	0,9	1,04

6.3.4.2 Ergebnisse der Evakuierungsanalyse

6.3.4.2.1 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.

6.3.4.2.2 Fall 2: Insassen begeben sich in die benachbarte Bahnröhre

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 Bahnröhre beträgt 1125 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 m^2).

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.

6.3.4.3 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 Bahnröhre das Gleis zu überschreiten und den ausgewiesenen sicheren Bereich in der benachbarten Straßenröhre zu erreichen. Während der Flucht außerhalb der vom Unfall betroffenen Röhre sind die Personen keinen unverträglichen Bedingungen ausgesetzt.

6.3.4.4 Bedingungen in der benachbarten Straßenröhre während der Evakuierung

Da im Falle der Evakuierung eines Zuges die benachbarte Straßenröhre als sicherer Bereich ausgewiesen ist, ist es wichtig, dass der Straßenverkehr in dieser Tunnelröhre rechtzeitig so gelenkt wird, dass von ihm keine Gefährdung für die fliehenden Zugpassagiere auf dem Seitenstreifen ausgeht.

Im Falle eines Zugbrandes in den Eisenbahnröhren werden beide Straßenröhren 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 Straßenröhre (Ri. DK) noch nicht vollständig verkehrsfrei sein wenn die ersten flüchtenden Passagiere sich auf den Seitenstreifen der Straßenröhre begeben. Deshalb müssen dort eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen ausgelöst werden:

Sicherheitsmaßnahmen:

- Der innere, normale Fahrstreifen wird für den Verkehr gesperrt werden;
- Auf dem äußeren Fahrstreifen der Straßenröhre wird die maximal zulässige Geschwindigkeit herabgesetzt werden;
- Warnungen an die Autofahrer werden über variable Textanzeiger und das Tunnelradio wiederholt ausgestrahlt werden;
- 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 werden Anweisungen vor und während der Evakuierung vom Zugpersonal sowie über die Lautsprecheranlage in der Straßenröhre erhalten;
- Ein Ersteinsatzfahrzeug des Tunnelbetreibers wird umgehend zur Ereignisstelle beordert werden und das Betriebspersonal wird die Passagiere vor Ort zusätzlich schützen und anleiten;
- 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 Ereignisröhre in die nicht betroffene Tunnelröhre 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 Ereignisröhre durch jede offene Fluchttür zu verhindern.

Das Belüftungssystem in den Straßen- und Bahnröhren ist ein Längslüftungssystem bestehend aus einer Reihe von Jet-Ventilatoren, 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.

6.3.5 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.

Dies gilt für beide Varianten des sicheren Bereichs, entweder in der unfallfreien Bahnröhre oder in der benachbarten Straßenröhre.

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

6.4 Zugbetrieb im Brandfall für nicht betroffene Züge

Es ist anzumerken – wie auch schon in Abschnitt 6.1 erwähnt –, dass ein Brand in einem Zug ein extrem seltenes Ereignis darstellt und dass alle Züge, denen die Einfahrt in den Tunnel gewährt wird, d. h. Züge der Kategorie B, die für diese Kategorie geltenden Vorgaben erfüllen müssen, was bedeutet, dass sie u. A. feuerbeständig sein müssen, sodass sie trotz Brand an Bord ihre Fahrt für mindestens 15 min bei einer Geschwindigkeit von mindestens 80 km/h fortsetzen können. Durch dieses Kriterium wird die Wahrscheinlichkeit des hier vorliegenden Szenarios weiter verringert.

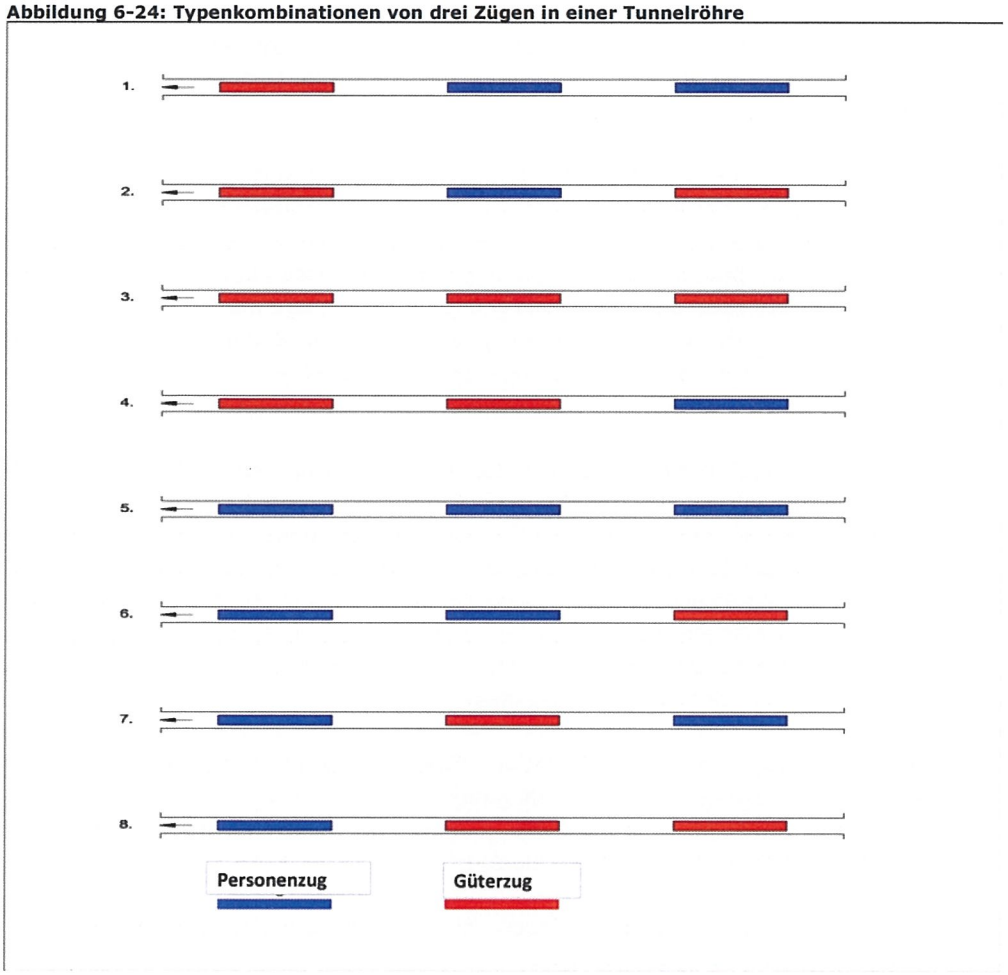
6.4.1 Situation in der vom Unfall betroffenen Tunnelröhre

Mit Femern A/S wurde vereinbart, dass für den Zugverkehr im Tunnel die folgenden Einschränkungen gelten sollen:

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

Drei Züge im Tunnel können theoretisch in acht verschiedenen Typenkombinationen auftreten; siehe Abbildung 6-24.

Abbildung 6-24: Typenkombinationen von drei Zügen in einer Tunnelröhre



Die Evakuierung aus dem vom Brand betroffenen Zug wird in Abschnitt 6.3.3 beschrieben. Außer dem verunfallten Zug ist auch die Sicherheit anderer Züge in der von dem Unfall betroffenen Bahnröhre zu berücksichtigen.

Züge, die sich in Fahrtrichtung vor dem verunfallten Zug befinden, können einfach aus dem Tunnel ausfahren. Dazu ist anzumerken, dass dies voraussetzt, dass der Bahnstrom nur in dem Oberleitungsabschnitt abgeschaltet wird, in dem sich der verunfallte Zug befindet. Züge, die sich in Fahrtrichtung hinter dem brennenden Zug befinden, müssen angehalten werden. Dank obiger Einschränkung kommt der unmittelbare Folgezug nicht näher als ca. 1,8 km an den verunfallten Zug heran, und ein in Längsrichtung arbeitendes Lüftungssystem gewährleistet, dass der von dem Brand herrührende Rauch den Folgezug bei diesem Abstand nicht erreicht. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass, wenn der Folgezug ein Personenzug ist, die Verkehrsleitzentrale alles Notwendige veranlassen wird, um auch diese Fahrgäste innerhalb eines angemessenen Zeitraums aus dem Tunnel zu befördern.

Eine grundsätzliche Evakuierung von Fahrgästen aus einem nicht vom Unfall betroffenen Zug in den sicheren Bereich ist zudem keine bevorzugte Strategie, denn dadurch würden die Rettungsarbeiten im Bereich des verunfallten Zuges, die schließlich die größte Dringlichkeit haben, vermeintlich erschwert.

Das ETCS-Signalsteuerungssystem erlaubt es, dass ein Zug rückwärts aus dem Tunnel ausfahren kann, vorausgesetzt, dass der Triebfahrzeugführer sich ans andere Ende des Zuges begibt. Dies lässt sich bei normalen Personenzügen aus Triebwagen oder mit Lokomotive und Steuerwagen innerhalb einer angemessen kurzen Zeit bewerkstelligen. Bei lokbespannten Zügen ohne Steuerwagen (z. B. Nachtzüge mit Schlafwagen oder Güterzüge) ist dies jedoch nicht ohne weiteres möglich. Bei solchen Zügen wird für das Rückwärtsfahren in der Regel eine zweite Person (Rangierer) als Ausguck am neuen Zugkopf benötigt. Das Ausfahren ist also möglich, erfordert allerdings Vorbereitungszeit.

Da heute nur noch wenige Personenzüge lokbespannt und ohne Steuerwagen fahren, werden in der folgenden Darstellung nur Güterzüge berücksichtigt. Wenn im Tunnel ein Güterzug hinter einem brennenden Zug zum Stehen kommt, kann davon ausgegangen werden, dass der Triebwagenführer, dem für ein solches Ereignis Anweisungen vorliegen, seinen Zug ohne Schwierigkeiten verlassen kann. Es besteht also unmittelbar kein Bedarf, den Zug rückwärts aus der Tunnelröhre zu fahren. Das in Längsrichtung wirkende Lüftungssystem gewährleistet, dass die von dem brennenden Zug stammenden Rauchgase und Wärme den Folgezug nicht erreichen.

Ein Personenzug in derselben Situation müsste jedoch wahrscheinlich rückwärts aus dem Tunnel herausfahren, da es nicht als gangbar erachtet wird, die Fahrgäste über einen längeren Zeitraum im Tunnel warten zu lassen. Ein Ausfahren kann jedoch nur erfolgen, wenn kein weiterer Zug das Gleis blockiert.

Die vorstehenden Ausführungen legen nahe, dass für den Bahnbetrieb im Tunnel eine weitere Einschränkung gelten sollte:

- Es sollte nicht möglich sein, dass ein Personenzug zwischen dem von einem Unfall betroffenen Zug vor ihm und einem weiteren Zug hinter ihm eingeschlossen wird. Das bedeutet Folgendes: Wenn ein Personenzug B hinter einem anderen Zug A im Tunnel fährt und ein weiterer Zug C auf den Personenzug folgt (insgesamt drei Züge im Tunnel – A, B und C), dann darf es sich bei dem letzten Zug nicht um einen Güterzug handeln.

Bezogen auf die in Abbildung 6-24 gezeigten Zugtypenkombinationen heißt dies, dass nur die Kombinationen 2 und 6 problematisch sind; diese sind zu vermeiden. Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, werden Szenarien, in denen drei Züge gleichzeitig in einer Tunnelröhre fahren, im normalen Betrieb nicht vorkommen. Wie in Abschnitt 4 dargelegt, wird dies auch in solchen Situationen kaum vorkommen, in denen der Normalbetrieb nach einer Störung wieder aufgenommen wird.

6.4.2 Situation in der unfallfreien Tunnelröhre

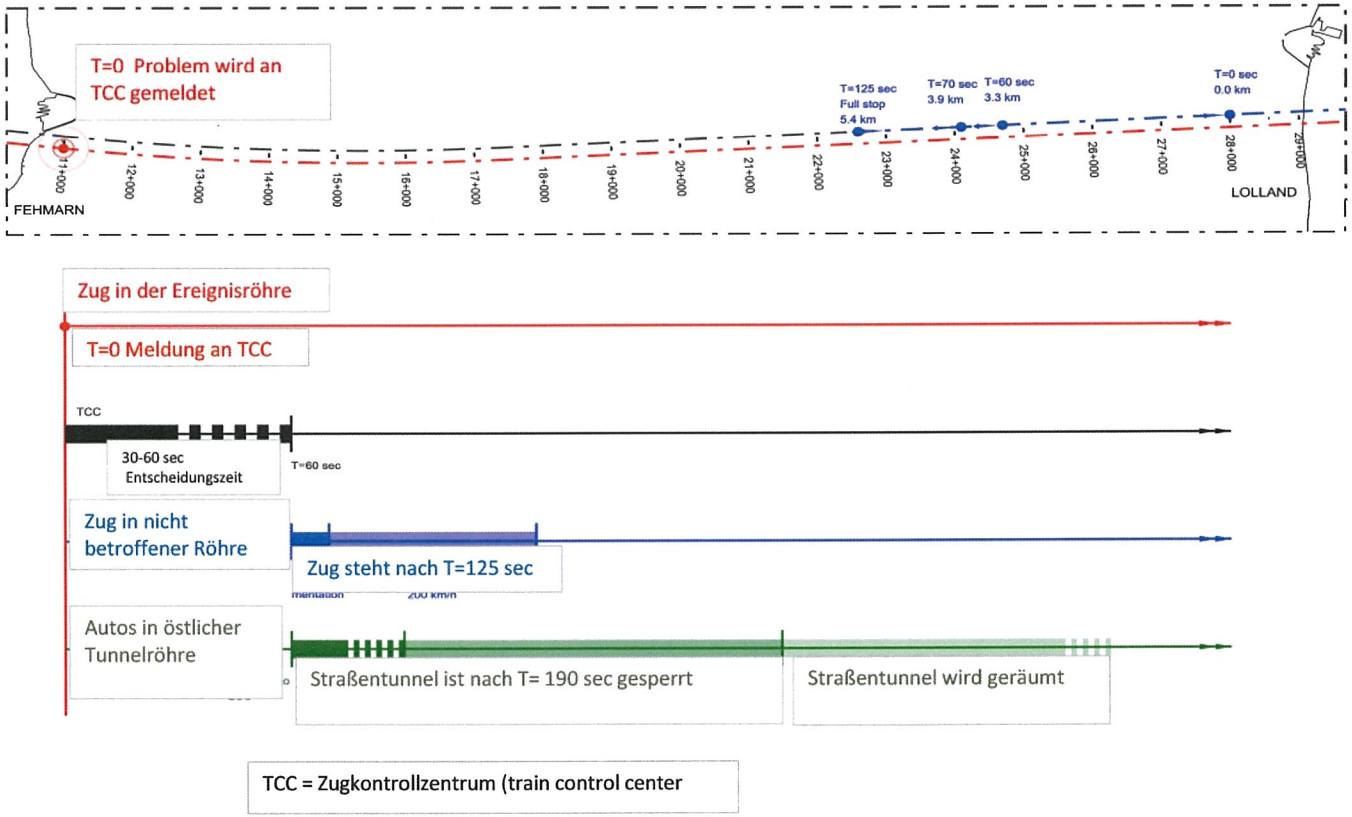
Im Fall eines Brandes in einem stehenden Personenzug in der äußeren Bahnröhre werden die Fahrgäste durch die innere Bahnröhre in den sicheren Bereich in der benachbarten Straßenröhre evakuiert.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie ein sicheres Überqueren des Gleises gewährleistet werden kann, ohne dass die Fahrgäste Gefahr laufen, in der unfallfreien Bahnröhre von einem Zug erfasst zu werden.

Abbildung 6-25: Zeitablauf während eines Brandszenarios
zeigt ein Szenario, in dem der stehende brennende Zug (rot) sich in der Nähe des Einfahrtportals befindet und ein Gegenzug (blau) soeben das gegenüberliegende Einfahrtportal passiert hat und nun in der benachbarten Bahnröhre fährt.

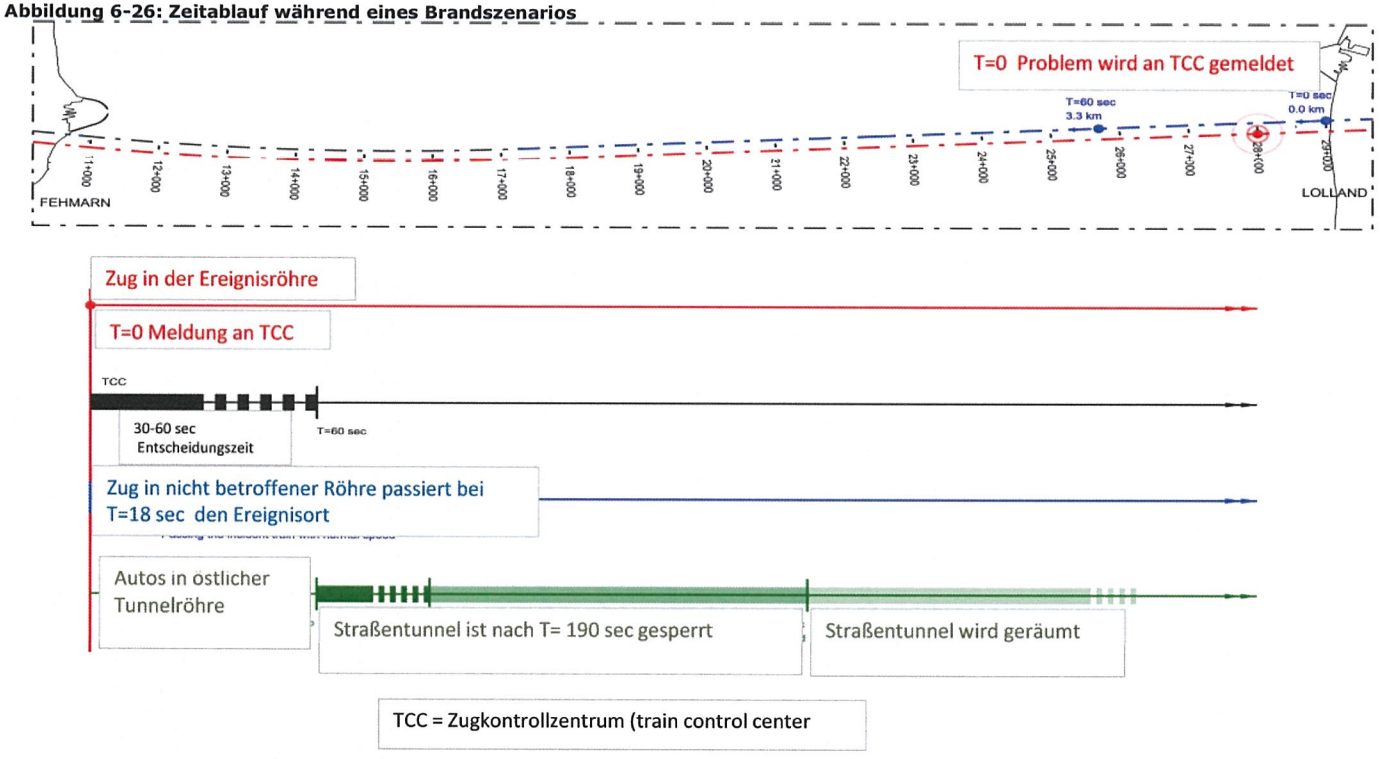
Abbildung 6-25: Zeitablauf während eines Brandszenarios
zeigt ein Szenario, in dem der stehende brennende Zug sich in der Nähe des Ausfahrtportals befindet und ein Gegenzug soeben das gegenüberliegende Einfahrtportal passiert hat und sich nun in der benachbarten Bahnröhre nähert. In diesem zweiten Fall besteht kein Zweifel, dass der nicht vom Unfall betroffene Zug seine Fahrt fortsetzen soll, damit die benachbarte Bahnröhre frei von Zügen ist.

Abbildung 6-25: Zeitablauf während eines Brandszenarios



2012-11-22 RAT-I-O-240-21.DGN

Abbildung 6-26: Zeitablauf während eines Brandszenarios



In Szenarien, die dem in Abbildung 6-25: Zeitablauf während eines Brandszenarios dargestellten ähneln, muss die Verkehrsleitzentrale entscheiden, ob der nicht von dem Unfall betroffene Zug anhalten oder weiterfahren soll.

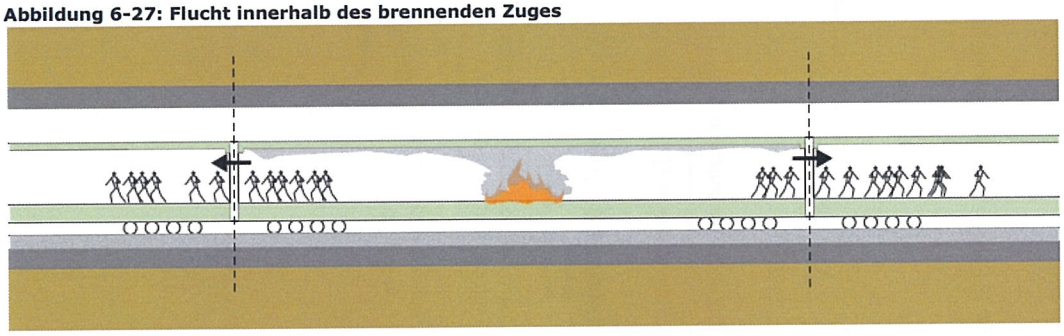
Keine der beiden Entscheidungsmöglichkeiten ist ideal:

Wird der Zug angehalten, kann es erforderlich werden, ihn rückwärts aus dem Tunnel ausfahren zu lassen. Setzt der Zug seine Fahrt fort, könnte eine Kollision mit Fahrgästen eintreten, die aus dem Unfalltunnel fliehen. Die Abbildungen zeigen die erwarteten Zeitabläufe in der vom Unfall betroffenen Bahnröhre (rot), in der Verkehrsleitzentrale (schwarz), in der unfallfreien Bahnröhre (blau) und in der benachbarten östlichen Straßenröhre (grün). Alle Zeitverläufe beginnen bei t = 0, dem Zeitpunkt, zu dem das Zugpersonal der Verkehrsleitzentrale mitteilt, dass der Zug brennt und nicht mehr fahrtüchtig ist.

Die unbedingte Notbremsfunktion des ECTS ermöglicht es der Verkehrsleitzentrale, einen simultanen Bremsbefehl an alle von dem Unfall betroffenen Züge (d. h. alle Züge im Einzugsbereich) auszugeben, unabhängig von deren aktueller Position (Blockabschnitt). Das bedeutet, dass alle Züge unmittelbar nach Ausgabe des Befehls mit dem Bremsen beginnen können (10 s Verzögerungszeit wurden angesetzt). Bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h benötigt ein Zug ab dem Zeitpunkt t=0 eine Strecke von ca. 5 km, bis er zum Stillstand kommt.

In der östlichen Straßenröhre laufen die Vorgänge etwas langsamer ab. Die Bedingungen sind im Einzelnen in Abschnitt 6.3.4.4 beschrieben.
Das Zugpersonal des verunfallten Zuges leitet die Evakuierung des Zuges in Zusammenarbeit mit der Verkehrsleitzentrale. Die Insassen des brennenden Wagens werden zunächst in die benachbarten Wagen geleitet
(siehe Abbildung 6-27: Flucht innerhalb des brennenden Zuges
, wo sie aufgrund der feuerhemmenden Türen zwischen den Wagen für einen gewissen Zeitraum sicher sind.

Abbildung 6-27: Flucht innerhalb des brennenden Zuges



Als Nächstes wird das Zugpersonal versuchen sicherzustellen, dass keine Zugpassagiere die unfallfreie Bahnröhre betreten, bevor die Verkehrsleitzentrale bestätigt hat, dass dies sicher ist. Es kann jedoch eine potenziell gefährliche Situation entstehen, wenn einige Fahrgäste

die Anweisungen nicht befolgen und versuchen zu fliehen, sobald sie die Notöffnungsmechanismen an den Zugtüren ausgelöst haben.

Die vorstehenden Ausführungen lassen den Schluss zu, dass für den Bahnbetrieb im Brandfall weitere Vorschriften angewendet werden sollten:

- Wenn ein nicht verunfallter Gegenzug sich innerhalb des Bremsabstands von dem verunfallten Zug befindet, sollte er nicht gebremst werden, sondern die unfallfreie Bahnröhre ungehindert verlassen.
- Wenn der nicht verunfallte Gegenzug anhalten kann, bevor er die Höhe des Unfallorts erreicht, sollte er den Befehl zum Bremsen erhalten.

Sofern es sich bei dem nicht verunfallten Zug, der vor Erreichen des Unfallorts zum Stehen gekommen ist, um einen Güterzug, kann er einfach an dieser Stelle halten und warten. Falls die Rettungs- und Bergungsarbeiten längere Zeit in Anspruch nehmen, kann es vorteilhaft sein, diesen Zug rückwärts aus dem Tunnel auszufahren. Falls es sich bei dem nicht verunfallten Zug um einen Personenzug handelt, sollte dieser entweder rückwärts aus dem nicht vom Unfall betroffenen Tunnel ausfahren oder zu der Höhe des Unfallortes geleitet werden, um eventuell wartendende Passagiere aus dem verunfallten Zug aufzunehmen.

6.4.3 Schlussfolgerung

Die Schlussfolgerung lautet, dass bestimmte Betriebsvorschriften eingeführt werden sollten, die einerseits im Normalbetrieb und andererseits im Sonderbetrieb bei Störungen/Unfällen gelten, um das Risiko potentiell gefährlicher Situationen zu mindern.

Weiterhin wird gefolgert, dass diese Regeln unter Berücksichtigung der vorangegangen Fahrplanstudie nur sehr geringen Einfluss auf die Kapazität der Bahnlinie haben werden.

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 Verkehrsleitzentrale der Feueralarm eingeht. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Rettungskräfte am Einsatzort wird die Evakuierung der Zugpassagiere 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 allen Tunnelröhren
- Lüftungssystem mit manueller Steuerung durch die Verkehrsleitzentrale
- BOS-Funkabdeckung in allen Tunnelröhren
- Bahnerdungsvorrichtungen (OLSP-Stationen)
- Stromanschlussdosen (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", EU-Entscheidung 2008/163/EG
[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 1.07.2008
[4] Femern A/S, Memo "How to use traffic data" Entwurf 2011-11-15[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 report, Femco-M-Not0087-Ventilation-Functional Description of System in Road, Rail and Gallery
[9] Femco report FEMCO-M-Rep0002-Ventilation in Road Tunnel – Design Basis
[10] Femco report FEMCO-M-Rep0003-Ventilation in Rail Tunnel – Design Basis

Anlage 1

Vergleich von CSM und Betriebsrisikoanalyse

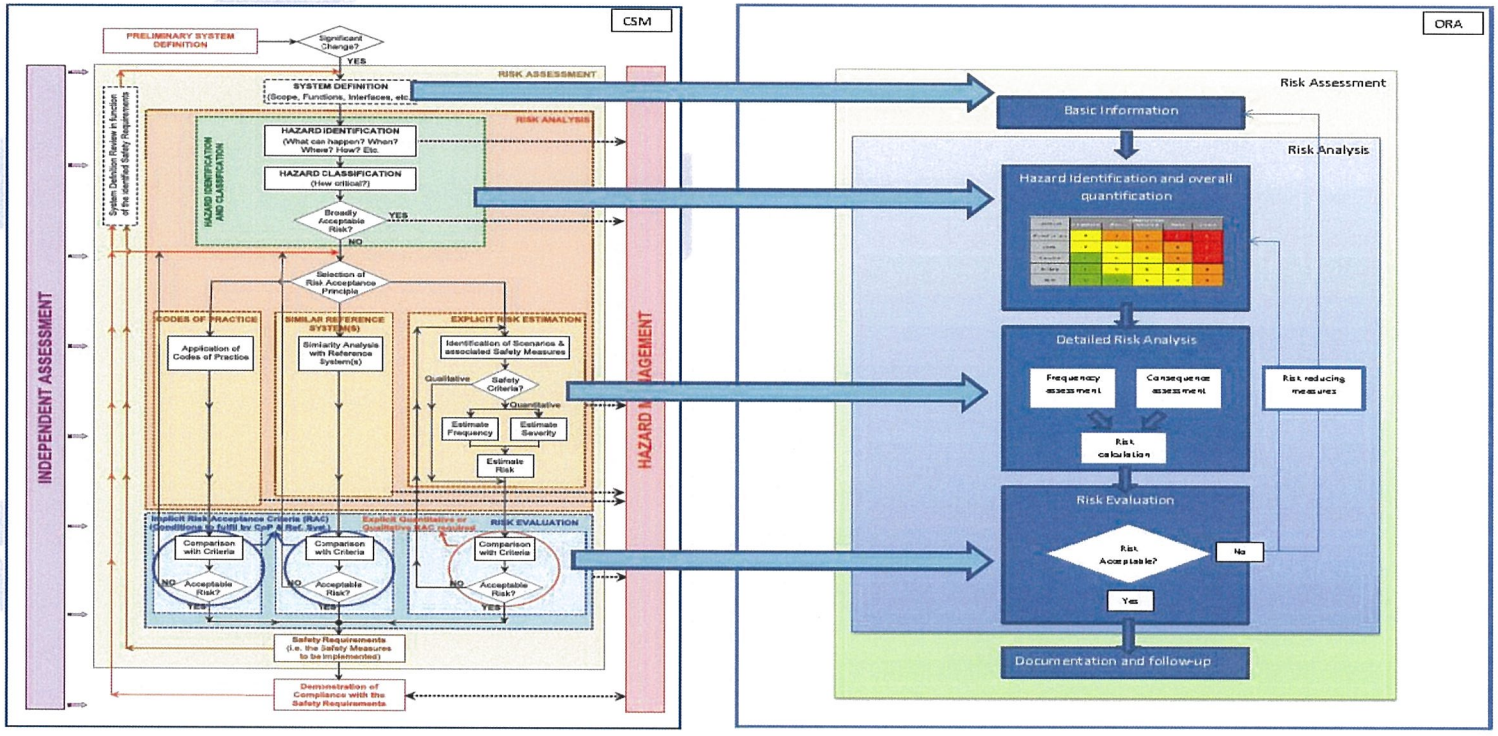



Abbildung 7-1 Gegenüberstellung CSM und Betriebsrisikoanalyse