

## TECHNISCHE MITTEILUNG

- ANLAGE 3 ZUR TN-NR.: RAT 6729-321-  
3D

S. 1-49

# Nachrichtlich

Thema	<b>Sicherheit im Eisenbahntunnel – Ergänzende Analyse des sicheren Bereichs – Druckregelung</b>
Bereich	<b>Sicherheit</b>
ATR-Nr.	<b>RAT73-JRS-152</b>
TN-Nr.	<b>RAT 6729-329-G</b>
An	<b>Johnny Restrup-Sørensen</b>
Von	<b>RAT, Jørn Tredal</b>
Verteiler	<b>Elisabeth Holskov Piel, Femern A/S</b>
Anhänge	-

Datum 12.04.2015

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

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

Erstellt von JA/MT  
Geprüft von JTR  
Genehmigt von

*EHP*

<b>1. Zweck der Technischen Mitteilung .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Basis .....</b>	<b>3</b>
2.1 Tunnelgeometrie .....	3
2.2 Planung und Ausschreibungsstrategie.....	5
2.3 Ausschreibungsplanung der Belüftung .....	6
<b>3. Ziel der druckgeregelten Belüftung.....</b>	<b>8</b>
<b>4. Gesamtbeschreibung der Druckregelungsanalyse.....</b>	<b>8</b>
4.1 Arbeitsschritte.....	8
4.2 Übersicht der Analyse.....	9
4.3 Berechnungssoftware – SES.....	10
<b>5. Hintergrund und Annahmen.....</b>	<b>11</b>
5.1 Tunnelsystem.....	11
5.2 Rollmaterial .....	12
5.3 Zugbetriebskonzept .....	13
5.4 Fluchtzeit- und Rettungsplan.....	13
5.5 Sicherheitsziele und entsprechende Ziele für die Rauchabsaugung/Belüftung in einem Notfallszenario .....	14
5.6 Bemessung der Brand- und Raucheindämmung .....	14
<b>5.7 Modellierte Zugbetriebsszenarien</b> .....	<b>15</b>
<b>5.8 Zug-Aerodynamik</b> .....	<b>22</b>
5.9 Rauchabführung und Lüftungskonzept.....	23
5.10 Worst-Case-Brandposition und Zugbetriebsszenario .....	25
5.11 Lüftungsstrategie.....	25
<b>6. Ergebnisse – Notfallszenarien.....</b>	<b>28</b>
6.1 Schiene/Schiene .....	28
<b>6.2 Schiene/Straße</b> .....	<b>34</b>
6.3 Annahmen und Erläuterungen zu den Berechnungen.....	36
6.4 Druckschwankungsverläufe.....	36
<b>7. Fazit.....</b>	<b>39</b>
7.1 Erfüllung der Sicherheits- und Rauchabführungsziele.....	39
<b>8. Auslegung der Tunnellüftungsanlage.....</b>	<b>40</b>
<b>8.1 Allgemeines</b> .....	<b>41</b>
<b>8.2 Notfalllüftung</b> .....	<b>41</b>
<b>8.3 Strahlventilatoren in Bahntunnelröhre</b> .....	<b>42</b>
<b>9. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>43</b>
<b>10. Empfindlichkeitsstudien.....</b>	<b>45</b>
<b>10.1 Empfindlichkeitsstudie – Tunnelquerschnittsfläche</b> .....	<b>45</b>
<b>10.2 Empfindlichkeitsstudie – Aerodynamische Parameter</b> .....	<b>47</b>
<b>10.3 Empfindlichkeitsstudie – Unfallfreier Güterzug</b> .....	<b>48</b>

## **1. Zweck der Technischen Mitteilung**

Diese Technische Mitteilung ist eine Anlage zum Dokument RAT 6729-321-3D Sicherheit im Eisenbahntunnel – Abschlussbericht (im Folgenden „Hauptdokument“ genannt). Dieses Dokument beschreibt, wie eine alternative technische Lösung für die Bereitstellung eines sicheren Bereichs in der Planung implementiert wird.

Das Hauptdokument enthält einen Überblick der Betriebsabläufe im Bahnverkehr in einer Reihe von Szenarien sowie eine Darstellung der Bedingungen im Tunnel während eines Brandes. Insbesondere die Druckverhältnisse in den Unfallröhren und den unfallfreien Röhren während eines Zugbrandes sind untersucht worden (Abschnitt 6.4.3.4 und 6.4.3.5).

Die vorliegende Technische Mitteilung beschäftigt sich ausführlicher mit der Druckverteilung in den Röhren während eines Zugbrandes und soll dokumentieren, wie die Rauchausbreitung kontrolliert werden kann, um das Eindringen von Rauch in die unfallfreien Röhren zu verhindern.

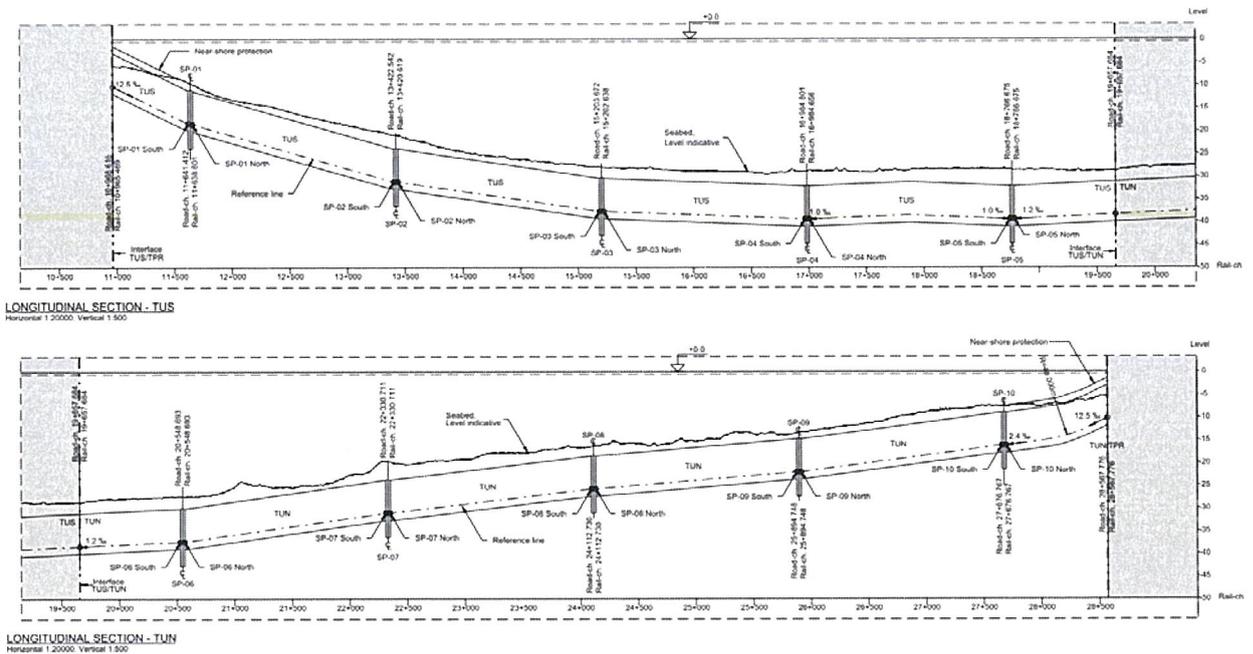
Dieses Dokument enthält keinen detaillierten Konstruktionsplan für das Belüftungssystem des Tunnels. Die hier beschriebene Analyse ist eine Machbarkeitsstudie, die zeigen soll, dass die Raumabmessungen der Röhren ausreichen, um ein Strahlventilator-Belüftungssystem mit erforderlicher Kapazität installieren zu können, und dass es möglich und machbar ist, auch unter Berücksichtigung des Vorhandenseins von Druckschwankungen infolge des Bahnverkehrs in der unfallfreien Röhre einen sicheren Fluchtweg vom Unfallort zu den unfallfreien Eisenbahn- und Straßentunnelröhren bereitzustellen.

Der ausführende Planer des Tunnelbelüftungssystems ist für die detaillierte abschließende Planung und Bemessung des Belüftungssystems verantwortlich.

## **2. Basis**

### **2.1 Tunnelgeometrie**

Ein Längsschnitt des Tunnels ist in Abbildung 1 dargestellt.



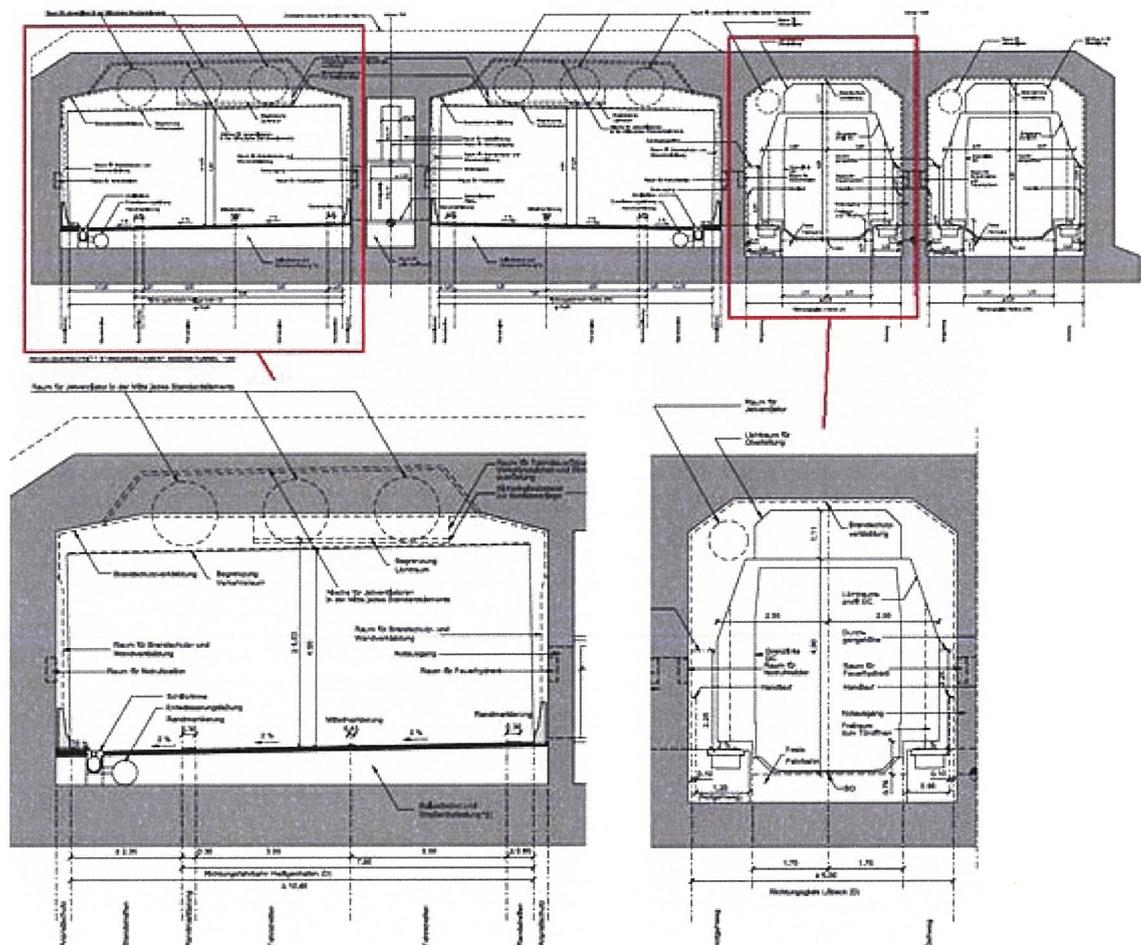
**Abbildung 1 - Längsschnitt des Tunnels (südlicher Teil: oben, nördlicher Teil: unten)**

Longitudinal section	Längsschnitt
Reference line	Bezugslinie
Near-shore protection	Ufernaher Schutz
Seabed, level indicative	Meeresbodenhöhe
Level	Höhenlinie

Die Länge beträgt ungefähr 18.000 m. Die maximale Tiefe des Tunnelbodens unterhalb der Wasseroberfläche beläuft sich auf ca. 40 m. Das Gefälle der Eisenbahntrasse beträgt 12,5 ‰. Wie in der Abbildung ersichtlich, gilt dies nur im Bereich der Portale.

Ein typischer Querschnitt des Tunnels ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die zwei separaten Eisenbahntunnelröhren befinden sich auf der östlichen Seite des Querschnitts. Die östliche Straßentunnelröhre ist als sicherer Bereich für die Zugpassagiere ausgewiesen, falls es erforderlich ist, einen Personenzug zu evakuieren.



**Abbildung 2 - Typischer Tunnelquerschnitt – mit vergrößerter Ansicht der Eisenbahn- und Straßentunnelröhre (Ausschnitte aus Zeichnungen RAT-T-N-X11-0631-4C und RAT-T-N-X11-0632-4C).**

## 2.2 Planung und Ausschreibungsstrategie

Die Feste Fehmarnbeltquerung ist als eine Reihe von Planungs- und Bauverträgen ausgeschrieben. Femern A/S hat eine Ausschreibungsplanung

erstellt, die als Grundlage der Ausschreibung dient. Die Ausschreibungsplanung stellt im Prinzip einen Planungsentwurf dar, wobei die detaillierte Ausarbeitung von Bereich zu Bereich variiert – abhängig davon, wo Femern A/S spezifische Lösungen fordert und wo für die Auftragnehmer ein gewisses Maß an Gestaltungsfreiheit besteht.

Beispielsweise ist die Gesamtgeometrie festgelegt – sowohl für den Tunnel als auch für den Rampen- und Anschlussbereich. Dies gilt auch für die Gesamtplanung von sicherheitsbezogenen Systemen. Auf Detailebene können die Auftragnehmer hingegen unterschiedliche Wege wählen, um die gesamten Anforderungen zu erfüllen.

### **2.3 Ausschreibungsplanung der Belüftung**

Das Belüftungskonzept für die Straßen- wie auch für die Bahntunnelröhren basiert auf Strahlventilatoren, die wie im Querschnitt gezeigt (Abbildung 2) unterhalb der Tunneldecke angebracht sind. Die Strahlventilatoren können in jeder Richtung eine horizontale Luftbewegung erzeugen, in der Unfallröhre entspricht die Richtung allerdings immer der Verkehrsrichtung.

Das Bemessungsszenario für das Belüftungssystem in den Straßentunnelröhren ist das Spitzenwertszenario für Abgasemissionen, während in den Bahntunnelröhren ein Brandszenario als Bemessungsszenario dient.

In den Straßentunnelröhren führt dies zu einer Situation, in der die erforderliche Anzahl Ventilatoren deutlich höher ist als die speziell für ein Brandszenario erforderliche Anzahl. Wie in Abbildung 2 dargestellt, werden die Ventilatoren in Nischen in der Tunneldecke installiert, wobei ein Abstand von ungefähr 400 m zwischen den Ventilatorengruppen vorhanden ist und jede Gruppe aus maximal drei Ventilatoren besteht. Im Normalbetrieb erzeugt der Fahrzeugverkehr eine ausreichende Luftbewegung (Kolbeneffekt), um für eine Belüftung der Straßentunnelröhren in Längsrichtung durch die Portale zu sorgen, ohne dass der Einsatz von Strahlventilatoren erforderlich ist.

Auch in den Bahntunnelröhren sorgen die fahrenden Züge im Normalbetrieb für die erforderliche Belüftung des Tunnels ohne den Betrieb von Strahlventilatoren.

Eine mechanische Belüftung ist nur dann erforderlich, falls und wenn ein Diesellokomotiv hindurchfährt oder während eines Brandes. Da weniger Platz verfügbar ist, sind im Gegensatz zur Straßentunnelröhre kleinere Strahlventilatoren gewählt worden, die in der Bahntunnelröhre zu installieren sind.

Alternativen zu Strahlventilatoren wären eine Quer- und Halbquerbelüftung über Belüftungskanäle oder Abluft-/Zuluftschächte an Zwischenpunkten. Belüftungsschächte in der Mitte des Tunnels werden als nicht machbar betrachtet, da dafür eine „Belüftungsinsel“ notwendig wäre; sie wurden daher in der Entwurfsplanungsphase verworfen. Ebenso wären für eine Quer- bzw. Halbquerbelüftung entlang des Tunnels übermäßig große Kanäle mit zahlreichen Abdeckgittern sowie ein erheblicher Druckabfall erforderlich. Dies würde einen größeren Tunnelquerschnitt notwendig machen und böte keine Vorteile hinsichtlich Funktion oder Sicherheit. Aufgrund der Anzahl der erforderlichen Dämpfer ist die statistische Zuverlässigkeit eines kanalgebundenen Systems sogar sehr viel niedriger als die einer Lösung mit Strahlventilatoren.

Abschnitt 8 enthält detailliertere Informationen zur tatsächlichen Bemessung des Belüftungssystems in der Bahntunnelröhre.

Die genaue Anzahl von Ventilatoren in jeder Bahntunnelröhre wird vom Auftragnehmer für elektrische und mechanische Anlagen festgelegt. Bei seiner Planung muss im Querschnitt der für die Ventilatoren erforderliche Platz berücksichtigt werden. In der Ausschreibungsplanung ist ausreichend Platz für normale, handelsübliche Strahlventilatoren einschließlich Montagerahmen vorgesehen. In Längsrichtung können die Lüfter hinsichtlich der Aerodynamik in einem Mindestabstand von 70–80 m installiert werden – allerdings ist die Gesamtzahl von Lüftern der entsprechenden Größe, die zur Erfüllung der Leistungsbeschreibung erforderlich sind, viel kleiner. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Anzahl von Ventilatoren entlang der Röhre für spezifische Zwecke, beispielsweise die Druckregelung, wie erforderlich anzupassen.

Druckregelung ist eine Funktion, die in einem Brandszenario relevant sein kann, um die Rauchausbreitung in die nicht verunfallte Röhre zu begrenzen. Während einer möglichen Evakuierung von Passagieren aus einem Zug und auch während des Einsatzes von Rettungsdiensten müssen die Fluchttüren zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre für bestimmte Zeiträume geöffnet sein. Daher besteht die Gefahr, dass Rauch in die angrenzende, unfallfreie Röhre geleitet wird. Wenn aber durch die Türöffnungen ein bestimmter Mindestluftstrom mithilfe des Belüftungssystems erzeugt wird, kann das Eindringen von Rauch in die benachbarte Röhre verhindert werden.

Dieser Luftstrom durch die Türöffnungen kann mittels eines Druckunterschieds zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre erzeugt werden, also einem Überdruck in der unfallfreien Röhre oder einem Unterdruck in der Unfallröhre – oder mit beidem in Kombination. Die erforderlichen Drücke müssen vom Belüftungssystem in jeder der relevanten Röhren bereitgestellt werden.

Ein weiterer Punkt, der in Betracht gezogen werden muss, ist die Tatsache, dass wenn der Druck im unfallfreien Tunnel sehr viel niedriger ist als im Unfalltunnel (wie zum Beispiel aufgrund des Kolbeneffekts von nicht verunfallten Zügen), starke Luftströme in den Querschlägen auftreten können.

Diese Luftströme können rauchbelastete Luft aus dem Unfalltunnel in den unfallfreien Tunnel leiten und sogar übermäßige Luftstromgeschwindigkeiten zur Folge haben.

Der Zweck der hier beschriebenen Analyse besteht darin, die mögliche Auswirkung der Druckunterschiede zwischen Tunneln in einer Reihe von Zugbetriebszenarien darzustellen und die betrieblichen Maßnahmen sowie die Belüftungsmaßnahmen zu ermitteln, die erforderlich sind, um potentielle Gesundheits- und Sicherheitsrisiken auszuschließen.

### **3. Ziel der druckgeregelten Belüftung**

Das Ziel eines druckgeregelten Belüftungskonzepts besteht darin, eine mögliche Rauchausbreitung in unfallfreie Röhren zu verhindern. Dies ist eine alternative technische Lösung gegenüber der EBA-Tunnelrichtlinie, die Luftschleusen in Querschlägen vorschreibt. Diese Luftschleusen werden als ausreichend angesehen, um die Ausbreitung von Rauch bis in den sicheren Bereich zu verhindern.

Die alternative Lösung sieht ein druckgeregeltes Belüftungskonzept vor, welches das gleiche Maß an Sicherheit bietet, wie es durch die Implementierung der Anforderungen in der EBA-Tunnelrichtlinie, beispielsweise die Einrichtung von Luftschleusen, gegeben wäre.

Die Erreichung dieses Ziels wird durch die Analyse der Druckverhältnisse in den Tunnelröhren in unterschiedlichen Szenarien für Zugstandort und Zugbetrieb sichergestellt.

## **4. Gesamtbeschreibung der Druckregelungsanalyse**

### **4.1 Arbeitsschritte**

In dieser Technischen Mitteilung werden Methodik und Ergebnisse der Druckregelungsanalyse vorgestellt.

Die Analyse basiert auf Informationen aus der Ausschreibungsplanung, wie zum Beispiel:

- Geometrie des Tunnels,
- Geometrie der Züge,

- Klimatische Bedingungen,
- Zugbetrieb,
- Bemessung des Belüftungssystems,
- Betriebsplan des Belüftungssystems und
- Notfallszenarien.

Es wird auf den relevanten Abschnitt im Hauptdokument RAT 6729-321-3D, „Sicherheit im Eisenbahntunnel – Abschlussbericht“ verwiesen.

Die Ergebnisse der Analyse werden in Form von Diagrammen vorgestellt sowie eine Schlussfolgerung gezogen im Hinblick auf die Erreichung des Gesamtziels: das Eindringen von Rauch in die angrenzende Röhre zu verhindern.

#### **4.2 Übersicht der Analyse**

Um die Probleme im Zusammenhang mit Druckunterschieden zwischen Unfalltunnelröhren und unfallfreien Tunnelröhren während eines Brandes zu ermitteln und um die erforderlichen Betriebs- und Belüftungsstrategien festzulegen, ist eine Reihe von Szenarien ausgewertet und dabei die Auswirkung folgender Kriterien untersucht worden:

- Standort des angehaltenen verunfallten Zuges.
- Geschwindigkeit des Zuges im unfallfreien Tunnel.
- Zeitverzögerungen zwischen verunfallten und nicht verunfallten Zügen.
- Bremsvorgänge.
- Anzahl offener Querschläge.
- Auswirkung der Tunnelbelüftungsanlage bei der Regelung des Luftstroms im Tunnel und in Querschlägen.
- Lage des Brandes im Zug.

Analysen hinsichtlich Unfällen in beiden Bahntunnelröhren sind durchgeführt worden. Im Falle eines Brandes in der äußeren Bahntunnelröhre erfolgt die Evakuierung durch die Durchquerung der inneren Bahntunnelröhre. In diesem Szenario werden die Druckunterschiede zwischen den beiden Bahntunnelröhren vom Zugbetrieb und vom Belüftungssystem bestimmt. Bei einem Brand in der inneren Bahntunnelröhre erfolgt die Evakuierung über die innere Röhre des Straßentunnels. In diesem Fall sind die Druckunterschiede ein Effekt des Straßenverkehrs.

Alle Analysen sind unter Verwendung der Subway Environment Simulation Software (SES) durchgeführt worden, einem eindimensionalen Netzwerk-Modellierungsprogramm. Der Modellierungsansatz und die Basis der Eingangsdaten für die Modellierung werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

Für den Schiene/Schiene-Brandfall sind insgesamt 16 Szenarien ausgewertet worden, um die nachvollziehbar schlechtesten Parameter zu ermitteln. Die Szenarien werden weiter hinten erläutert.

#### **4.3 Berechnungssoftware – SES**

SES ist ein auf Konstrukteure ausgerichtetes Programm, das von der amerikanischen Verkehrsbehörde (United States Department of Transportation, USDOT) entwickelt wurde. Es kann verwendet werden, um eine eindimensionale Darstellung eines unterirdischen Verkehrsnetzwerkes zu erstellen, das in der Regel aus Tunneln und Luftpfaden für Stationen besteht. Die Software stellt Luftstrom-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsdaten für Tunnelsysteme in allen Betriebsarten bereit. Sie wird außerdem verwendet, um Zugbewegungen und den sich aufgrund des Kolbeneffekts daraus ergebenden Luftstrom zu simulieren. SES besitzt eine Brandsimulationsfunktion, um den Konstrukteur in die Lage zu versetzen, Leistungsvermögen und Betriebsarten der Ventilatoren für Notfallszenarien festzulegen.

Die Software ist im Rahmen von Modelltests und Großversuchen ausführlich geprüft worden. Das Programm ist für die Planung und Analyse zahlreicher Untergrundprojekte weltweit erfolgreich eingesetzt worden.

SES ist verwendet worden, um Zugbrände in ausgewählten Abschnitten des Tunnels zu simulieren, einschließlich der Leistung des Belüftungssystems bei der Aufrechterhaltung der kritischen Luftgeschwindigkeit, um die Rauchausbreitung einzudämmen. Das SES-Zugsimulationsmodul ist insbesondere eingesetzt worden, um Luftstromschwankungen zu ermitteln, die durch das Anhalten des verunfallten Zuges, die Verlangsamung des nicht verunfallten Zuges und die Öffnung von Querschlägen verursacht werden.

SES wird als das am besten geeignete Werkzeug für die erforderliche Analyse von Druckschwankungen und des Luftstroms betrachtet, da es in der Lage ist, die wechselnden aerodynamischen Auswirkungen aufgrund der Zugbewegungen als auch aufgrund des Tunnelbelüftungssystems im Modell abzubilden. SES weist im Vergleich zu CFD-Universalsoftware (der Vollständigkeit halber unten hervorgehoben) einige spezifische Einschränkungen auf, wird aber für diese Anwendung als besser geeignet betrachtet.

Da SES eindimensional ist, kann der Luftstrom durch einen bestimmten Abschnitt nur jeweils in einer Richtung erfolgen. Dies bedeutet, dass Luftgeschwindigkeitsprofile in Tunnelquerschnitten oder dreidimensionale Querströme in komplexen Geometrien nicht als Modell dargestellt werden.

Darüber hinaus ist SES nicht in der Lage, die Auswirkung unterschiedlicher Luftdrücke am Portal aufgrund von Wind oder die Auswirkung von Auftrieb

aufgrund lokaler Temperaturunterschiede in die Berechnung einzubeziehen. Um ein Tunnelbelüftungssystem zu spezifizieren, muss eine Toleranz für Luftdrücke am Portal separat berechnet und den von SES ermittelten Gesamtdruckanforderungen hinzugerechnet werden. Darauf wird in Abschnitt 5.1 unten näher eingegangen.

Die eindimensionale Art der Berechnung hat eine weitere Einschränkung der Brandrauchmodellierung zur Folge, wo eine stratifizierte bidirektionale Strömung auftreten kann. In der Praxis strömt in jedem Tunnel oder Stationssegment, wenn heiße Verbrennungsprodukte in großer Höhe vom Brand wegziehen, kühle Luft in niedriger Höhe zum Brandherd. SES kann dieses Phänomen nicht modellieren, da im eindimensionalen Modell die Luft entweder in die eine oder in die andere Richtung strömen muss.

## 5. Hintergrund und Annahmen

### 5.1 Tunnelsystem

Die Geometrie der Straßen- und Bahntunnelröhren wurde in der Abbildung 2 dargestellten Tunnelquerschnitt entnommen, während die Gefälle Abbildung 1 entnommen wurden.

	<b>SCHIENE</b>	<b>STRASSE</b>
Querschnittsfläche, m <sup>2</sup>	34,5	56,5
Umkreis, m	23,2	31,85
Rauheit, m	0,007	0,01
Reibungsfaktor	0,02	0,02
Maximales Gefälle des eingeschlossenen Tunnels, ‰	12,5	12,5

Wetterdaten, einschließlich der Winddrücke am Portal, sind in der Analyse der Druckschwankungen nicht explizit berücksichtigt worden, da diese Daten in SES nicht einbezogen werden können. Bei der Bemessung des Tunnelbelüftungssystems, wie zum Beispiel der Strahlventilatoren, ist es allerdings notwendig, eine Toleranz aufzurechnen, um Winddrücken und dem Kamineffekt Rechnung zu tragen. Diese werden mit einem Maximum von 59 Pa im Hauptdokument (RAT 6729-321-3D) angegeben und bestehen aus:

- 45 Pa aufgrund von ungünstigem Wind an einem Portal
- 14 Pa aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen den deutschen und den dänischen Portalen.

Es ist zu beachten, dass die 45 Pa einer Windgeschwindigkeit von ungefähr 9 m/s entsprechen, wobei der Wind in und entlang der Achse des Tunnels an einem erhöhten Portal weht; in der Praxis reduzieren die nach innen versetzten Portale aufgrund der Trogbauweise die Druckunterschiede erheblich, sodass die 45 Pa tatsächlich viel höhere Windgeschwindigkeiten repräsentieren, die weitaus weniger häufig sind.

In der in dieser Technischen Mitteilung vorgestellten Analyse sind nur die aerodynamischen Eigenschaften der Züge und das mögliche Belüftungssystem in Betracht gezogen worden. Weder die Temperatur im Tunnel unter normalen Betriebsbedingungen noch die thermischen Eigenschaften des Tunnels, des Meeresbodens und der Gewässer in der Umgebung des Tunnels sind untersucht worden. Diese Parameter werden hinsichtlich der Auswirkung des Brandes, der Zugblockade und des Kolbeneffekts des Zugs als nicht wichtig betrachtet.

## 5.2 Rollmaterial

Es gibt verschiedene Arten von Rollmaterial, das wie in Abschnitt 4.1 des Hauptdokuments erläutert im Tunnel vorhanden sein kann:

- Intercity-Züge.
- Regionalzüge.
- Güterzüge.

Bei der durchgeführten Analyse wurde davon ausgegangen, dass es sich beim verunfallten Zug um einen aus acht Wagen bestehenden Personenzug mit einer Länge von 200 m handelt. Die nicht verunfallten Züge wurden in den meisten Fällen ebenfalls als 200 m lange Personenzüge modelliert. Zusätzliche Simulationen wurden durchgeführt, um die Auswirkung eines nicht verunfallten Güterzugs festzustellen. Der Brand eines Güterzuges ist nicht analysiert worden, da dies nur den Lokomotivführer des Güterzuges betrifft, der in der Selbstrettung ausgebildet ist. Probleme in Bezug auf die Belüftung während längerer Fluchtzeiten mehrerer Personen sind an sich nicht relevant.

Die Geometrie der modellierten Züge ist in Tabelle 1 aufgeführt. Der Personenzug ist repräsentativ für einen typischen modernen Intercity- oder Regionalzug, wie zum Beispiel der Bombardier Regina-Baureihe oder der FLIRT-Baureihe. Für den Güterzug wurde eine größere Länge von 750 m angenommen sowie ein weniger aerodynamischer Triebwagen und eine höhere Oberflächenreibung aufgrund der Waggons.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Einzelheiten zum tatsächlichen Rollmaterial (sowohl Personen- als auch Güterzüge), das im Tunnel verkehren wird, derzeit nicht bekannt sind. Änderungen an Zuggeometrie und Aerodynamik-Parametern sind vorbehalten. Die Parameter wurden als

repräsentativ für das aktuelle Rollmaterial gewählt, um die Analyse durchführen zu können.

**Tabelle 1 – Einzelheiten des Rollmaterials wie im Modell**

	<b>PERSONENZUG</b>	<b>GÜTERZUG</b>
Länge, m	200	750
Fläche, m <sup>2</sup> :	14	14
Umkreis, m	15	15
Oberflächen- Reibungskoeffizient	0,023	0,03
Widerstandsbeiwert des Zugs	0,3	1
Maximalgeschwindigkeit, km/h	200	140

### 5.3 Zugbetriebskonzept

Das Gesamtkonzept für den Zugbetrieb wird ausführlich im Hauptdokument RAT 6729-321-3D „Sicherheit im Eisenbahntunnel – Abschlussbericht“, Abschnitte 3, 4 und 5 erläutert.

Fahrplanstudien sind durchgeführt worden, um realistische Einschätzungen des Aufbaus zukünftiger Fahrpläne vorzunehmen. Die Fahrplanstudien zeigen, dass sich während des normalen Zugbetriebs in der Regel nur jeweils ein Zug in einer Röhre befindet. Wenn sich aufgrund einer Störung mehrere Züge hintereinander in Wartestellung befinden, kann eine Röhre von maximal drei Zügen belegt werden.

Die Reihenfolge der Züge wird in jedem Fall so gesteuert, dass ein Personenzug nicht zwischen zwei anderen Zügen eingeschlossen werden sein kann, ohne dass in einem Szenario, bei dem der vordere Zug Feuer gefangen hat und nicht mehr fahrtüchtig ist, die Möglichkeit besteht, zurückzusetzen und so die Unfallstelle zu verlassen.

### 5.4 Fluchtzeit- und Rettungsplan

Falls die Evakuierung eines Personenzugs notwendig ist – also wenn beispielsweise ein Zug Feuer gefangen hat und nicht mehr aus eigener Kraft den Tunnel verlassen kann – werden die Fahrgäste über Fluchttüren zur benachbarten Straßentunnelröhre, die ein ausgewiesener sicherer Bereich ist, evakuiert.

Falls sich der Unfall in der östlichen Bahntunnelröhre, also der äußersten Bahntunnelröhre ereignet hat, müssen die Fahrgäste die westliche Bahntunnelröhre durchqueren, um den ausgewiesenen sicheren Bereich zu erreichen.

Der Evakuierungsprozess ist unter Annahme verschiedener Voraussetzungen simuliert worden: Es wird auf das Hauptdokument einschließlich Anlage 2 zum Hauptdokument verwiesen. Als Teil der vorliegenden Druckregelungsanalyse wird untersucht, ob während der ersten Phase der Evakuierung widrige Druckbedingungen auftreten, bevor sich die Druckverhältnisse in den Röhren stabilisieren.

Die Analyse der Fluchtzeitberechnungen ergibt eine Reihe von Zeitlinien für die Entdeckung des Brandes bis zu dem Zeitpunkt, an dem Maßnahmen ergriffen werden. Es wird darauf hingewiesen, dass der früheste Zeitpunkt, an dem der Zug evakuiert wird, 150 Sekunden nach Alarmauslösung liegt (es wird zudem auf Anlage 1 des Hauptdokuments verwiesen). Es wird allerdings auch ausgesagt, dass der früheste Zeitpunkt, an dem ein Querschlag geöffnet werden könnte, 42 Sekunden nach dem stoppen des verunfallten Zugs liegt. Grund könnte die Selbstevakuierung von Fahrgästen sein, die erfolgt, bevor der Lokomotivführer die entsprechenden Anweisungen gibt.

## **5.5 Sicherheitsziele und entsprechende Ziele für die Rauchabsaugung/Belüftung in einem Notfallszenario**

Das Ziel des Belüftungskonzepts in einem Brandszenario besteht letztendlich darin, eine sichere Evakuierung der Zugfahrgäste sicherzustellen, sowohl wenn diese sich noch in der Unfallröhre befinden als auch beim Wechsel in die benachbarte Röhre.

Darüber hinaus besteht das Belüftungsziel darin, sicherzustellen, dass die Anforderungen an einen sicheren Bereich in der benachbarten Straßentunnelröhre erfüllt werden, die Bedingungen also das Überleben erlauben.

Daher müssen die Belüftungssysteme einen Mindestluftstrom in Längsrichtung (kritische Geschwindigkeit) in der Unfallröhre erzeugen können, um die Rauchausbreitung in dieser Röhre einzudämmen. Außerdem muss eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit über geöffnete Fluchttüren sichergestellt sein, um zu verhindern, dass sich Rauch von einer Röhre zur anderen ausbreitet. Die vorgeschlagenen Kriterien dienen dazu, eine Luftstromgeschwindigkeit von 2 m/s in den Querschlägen gemäß der Empfehlung von Langner et al [1] zu erreichen.

Durch das Strahlventilatorenkonzept ist ein hohes Maß an Redundanz gewährleistet, da alle Ventilatoren einzeln gesteuert werden.

## **5.6 Bemessung der Brand- und Raucheindämmung**

Gemäß der im Hauptdokument beschriebenen CFD-Analyse wurde für die SES-Analyse im Modellversuch ein 20-MW-Brand angenommen, der im hinteren Teil des Zuges ausgebrochen ist. Es wurden keine zusätzlichen

Szenarien herangezogen, um die Auswirkung der Lage des Brandherdes auf den Luftstrom in den Querschlägen zu überprüfen. Es wird allerdings nicht davon ausgegangen, dass die Lage des Brandherds in Relation zu den Querschlägen eine signifikante Auswirkung auf die Luftmassenströme in den Unfalltunneln und den unfallfreien Tunneln hat, sondern nur dann, falls überhaupt, wenn Frischluft oder rauchbelastete Luft über Querschläge angesogen wird.

Des Weiteren ist zu erwähnen, dass der Brand im SES wie es üblich ist mit vollständiger Wärmeabgabe (HRR) von konstant 20 MW modelliert wurde.

Für diese Brandgröße wurde die kritische Geschwindigkeit in der Bahntunnelröhre mit 2,6 m/s im Ringraum zwischen Tunnel und Personenzug berechnet. Dies entspricht einer Strömungsrate von 53 m<sup>3</sup>/s, die vor der Lage des Brandherdes erforderlich ist.

## 5.7 **Modellierte Zugbetriebsszenarien**

Für die hier durchgeführten Analysen sind insgesamt 18 Brandherde und Zugbetriebsszenarien für den Schiene/Schiene-Fall herangezogen worden (ein Brand in der äußeren Bahntunnelröhre mit Evakuierung über die innere Bahntunnelröhre); die Ergebnisse werden in Abschnitt 6 ausführlich erläutert.

Die Szenarien reichten vom vereinfachten Zugbetrieb, anhand dessen die allgemeinen Eigenschaften des Tunnels näher beleuchtet wurden, bis hin zum realistischen Zugbetrieb während eines Unfalls. Die Fälle sind gewählt worden, um das gesamte Spektrum von Möglichkeiten aufzuzeigen und dadurch neben gängigeren/realistischeren Fällen auch die Best-Case- und Worst-Case-Szenarien zu ermitteln. Wie im Folgenden beschrieben sind verschiedene Hauptparameter variiert worden.

### 5.7.1 Standort des verunfallten Zugs, Abläufe und Querschläge

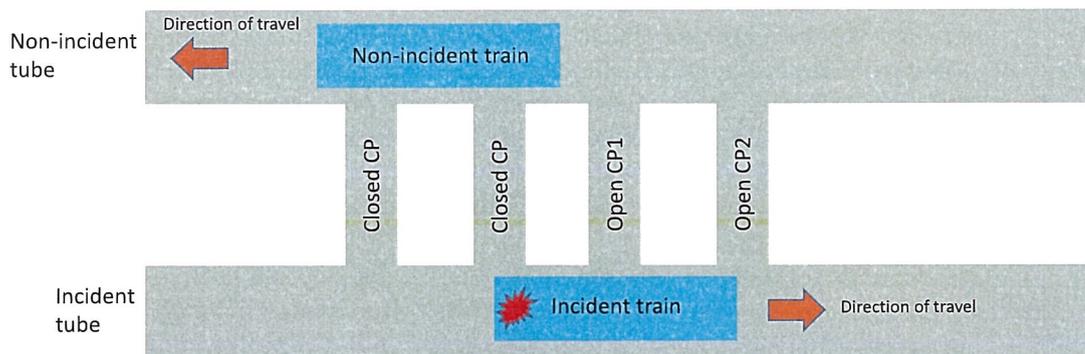
Drei Unfallstellen werden in Betracht gezogen:

- Anfang des Tunnels – Vorderseite des Zugs 330 m vom Eingangsportal (neben dem dritten Querschlag).
- Mitte des Tunnels – Vorderseite des Zugs 8690 m vom Eingangsportal.
- Ende des Tunnels – Vorderseite des Zugs 220 m vom Ausgangsportal.

Es wird simuliert, dass der verunfallte Zug mit einer Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h in den Tunnel einfährt. Es wird angenommen, dass der verunfallte Zug mit einer Verzögerungsrate von 4,3 km/h pro Sekunde abbremst, wodurch er nach ungefähr 45 Sekunden zum Stillstand kommt. Wenn der Zug angehalten hat, wird in der Simulation der Brand entzündet und später die Querschläge geöffnet.

Es wird davon ausgegangen, dass sich das Ende des Zuges (also der Brand) direkt hinter einem geschlossenen Querschlag befindet. Bei der Simulation wird die Annahme zugrunde gelegt, dass ein Querschlag auf etwa halber Länge des Zuges (in den Ergebnissen als CP1 oder erster Querschlag bezeichnet) und ein Querschlag hinter der Spitze des Zuges (in den Ergebnissen als CP2 oder zweiter Querschlag bezeichnet) geöffnet wird. Dies ist in Abbildung 4 unten dargestellt.

<i>(Zu Abb. 4, unten)</i>	
non-incident tube	Unfallfreie Röhre
direction of travel	Fahrtrichtung
non-incident train	Unfallfreier Zug
closed CP	Geschlossener Querschlag
open CP1	Geöffneter Querschlag 1
open CP2	Geöffneter Querschlag 2
incident tube	Unfallröhre
incident train	Unfallzug



**Abbildung 3 – Schematische Darstellung des verunfallten Zuges und der Lage des Brandherdes in Relation zu den geöffneten Querschlägen.**

Die Zeit zwischen dem Abbremsen des Zuges und dem Öffnen der Querschläge ist ein kritischer Parameter und wurde im Einzelnen untersucht. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 6 dokumentiert.

Es ist zu beachten, dass die Querschläge so simuliert werden, als seien sie vor dem Anhalten des Zuges geschlossen. Dies sind die physikalischen Bedingungen, für die die realistischen anfänglichen Luftströmungen in beiden Röhren vor dem Unfall in Betracht gezogen werden müssen.

### 5.7.2 Unfallfreier Zugbetrieb

Die nicht verunfallten Züge wurden so modelliert, dass sie im Vergleich zum verunfallten Zug zu verschiedenen Zeitpunkten in den Tunnel einfahren:

- Gleichzeitig
- Vorher
- Nachher (auf Grundlage eines nicht verunfallten Zuges, der vor Erteilung des Stoppsignals einfährt)

Dies wurde getan, um die Bandbreite des Systemverhaltens festzustellen; außerdem lässt sich so das Spektrum von Druckschwankungen ermitteln, die auf die geöffneten Querschläge während eines Unfalls einwirken. Falls erforderlich, können andere spezifische Schwankungen untersucht werden. Züge, die zur gleichen Zeit oder kurz danach einfahren, werden als Worst-Case betrachtet, da sie sich weiterhin in der Nähe (Höhe) des Unfallortes befinden, wenn die Querschläge, also die Notausgangstüren, geöffnet werden.

Die Entscheidungszeitlinie für einen Brandunfall (Anlage 1 des Hauptdokuments) zeigt an, dass die nicht verunfallten Züge innerhalb von 0-30 Sekunden nach Alarmauslösung durch einen havarierten Zug, ein Stoppsignal erhalten. Innerhalb des Zeitrahmens von 40-60 Sekunden

erhalten vor der Höhe der Unfallstelle befindliche Züge die Anweisung, mit 40 km/h weiterzufahren. Da ein Zug für das Abbremsen ungefähr 45 Sekunden benötigt, erhalten die Züge die zweite Anweisung, bevor sie die verminderte Geschwindigkeit von 40 km/h erreichen. Der nicht verunfallte Zug ist so im Modell dargestellt worden, dass er 30 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug gestoppt ist, mit dem Abbremsen auf 40 km/h beginnt.

Die Auswirkung eines nicht verunfallten Zuges, der mit 200 km/h die Fahrt fortsetzt, ist im Rahmen einer Empfindlichkeitsstudie untersucht worden, um zusätzliche Informationen über das Verhalten des Systems in Erfahrung zu bringen; diese Informationen sind allerdings nicht in den Ergebnissen enthalten, da sie kein realistisches Worst-Case-Szenario repräsentieren. Diese sind die unten beschriebenen „a“- Szenarien.

Auf dieser Stufe der Analyse sind lediglich ein einzelner verunfallter und ein einzelner nicht verunfallter Personenzug in Betracht gezogen worden, also insgesamt zwei Züge.

Für diese Analyse ist davon ausgegangen worden, dass sich nicht mehr als ein Zug in jeder Röhre befindet. Beispielsweise wurde für die Analyse weder angenommen, dass ein Zug dem verunfallten Zug gefolgt ist und weiter hinten im Tunnel anhält, noch dass sich ein Zug vor dem verunfallten Zug befindet, der den Tunnel verlassen muss. Die Auswirkung eines nicht verunfallten Zuges, der während der Evakuierung rückwärts aus dem Tunnel fährt, ist nicht analysiert worden, da nicht damit gerechnet wird, dass dies während des Zeitraums einer Evakuierung geschieht. Darüber hinaus wurden nicht verunfallte Züge, die in der unfallfreien Röhre mit 40 km/h fahren, nicht berücksichtigt, da in den realistischen Worst-Case-Szenarien vorherige Züge den Tunnel verlassen haben und nachfolgende Züge gestoppt werden, sodass im Vergleich zum Zug, der mit 40 km/h weiterfährt, die Auswirkungen auf den Luftstrom minimal sind.

Das gesamte Spektrum der anfänglich in Betracht gezogenen Brandherde und Zugbetriebsabläufe ist in Tabelle 2 dargestellt. Auf die Belüftungsstrategie wird im weiteren Verlauf des Berichts eingegangen. Mit diesen Simulationen wurde der Zweck verfolgt, eine Reihe von typischen und extremen Betriebszenarien zu ermitteln, um anhand derer das „realistische Worst-Case-Szenario“ wie in Abschnitt 5.10 beschrieben zu entwickeln.

Der Einfachheit halber enthält dieser Bericht nur die Ergebnisse des realistischen Worst-Case-Szenarios und von Variationen desselben. Die Szenarien in Tabelle 2 sind der Vollständigkeit halber aufgelistet.

In den Szenarien 1, 2 und 3 ereignet sich der Brandunfall in der Mitte des Tunnels. In den Szenarien 4 und 5 ereignet er sich am Ende des Tunnels. In den Szenarien 6 und 7 ereignet er sich am Anfang des Tunnels.

In den Szenarien „a“ (zum Beispiel 1a) verringert der nicht verunfallte Zug die Geschwindigkeit nicht und fährt mit 200 km/h weiter. Dies wird als unwahrscheinliches Worst-Case-Szenario eingeschätzt und würde nur im Fall eines zweifachen Unfalls eintreten, also wenn ein Zugbrand vorläge und es im Anschluss an einen Alarm zu einem Ausfall der Kommunikation käme (das Notbremsignal wird entweder nicht ausgegeben oder vom nicht verunfallten Zug nicht empfangen). In diesem Fall wäre es nicht möglich, dem Kolbeneffekt des Zuges mit einem Tunnelbelüftungssystem entgegenzuwirken. Diese „a“-Szenarien werden nur durchgespielt, um einen Überblick des aerodynamischen Verhaltens der Tunnel zu gewinnen, nicht aber als Worst-Case-Szenario für die Konstruktion, da der Unterdruckzustand hinter einem nicht verunfallten Zug, der mit 200 km/h fährt, durch kein angemessenes Belüftungssystem ausgeglichen werden kann.

In den „b“-Szenarien senkt der nicht verunfallte Zug einige Sekunden, nachdem der verunfallte Zug den Bremsvorgang eingeleitet hat, die Geschwindigkeit auf 40 km/h, wodurch der Unterdruck im unfallfreien Tunnel drastisch abnimmt. Dies ist ein übermäßig optimistisches Szenario, da es unwahrscheinlich ist, dass Züge bremsen, bevor der verunfallte Zug angehalten und einen Alarm ausgelöst hat (sofern Züge nicht automatisch bremsen, wenn ein anderer Zug einen außerplanmäßigen Halt einlegt).

Die Szenarien 1c und 1d stehen für eine Situation, in der das Stoppsignal für den nicht verunfallten Zug verzögert ausgegeben wird und dementsprechend das Abbremsen des nicht verunfallten Zugs mit Verzögerung erfolgt. In den „c“-Szenarien leitet der nicht verunfallte Zug den Bremsvorgang ein, sobald der verunfallte Zug angehalten hat (ein optimistischer Fall). In den „d“-Szenarien leitet der nicht verunfallte Zug 30 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug angehalten hat, den Bremsvorgang ein (ein realistischer Fall). In Szenario 1e wurde die Auswirkung der Öffnung zusätzlicher Querschläge untersucht.

Die Szenarien 1f und 1g stellen die Situation nach, die vorliegt, wenn 42 Sekunden nachdem der verunfallte Zug angehalten hat, die Querschläge geöffnet werden. Dies basiert auf der Annahme, dass die Fahrgäste den Zug verlassen, noch bevor sie dazu aufgefordert werden. In Szenario 1g wird das Belüftungssystem früher aktiviert.

In Szenario 1h wird von einem realistischen Evakuierungsszenario ausgegangen, bei dem 150 Sekunden, nachdem der Zug angehalten hat, der Lokomotivführer des verunfallten Zuges die Fahrgäste anweist, den Zug zu verlassen.

Dies führte zur Auswahl von Szenario 1h als Referenz-Worst-Case-Szenario, während die Szenarien 1d, 1e, 1f und 1g schwerwiegendere Variationen

darstellen, mit denen untersucht wird, was passiert, wenn die Querschläge früher als erwartet geöffnet werden.



Tabelle 2 – Lage von Bränden und Zugbetriebszenarien

Szenario	Lage des Brandes			Beschreibung des Zugbetriebs
	Beginn	Mitte	Ende	
1a		X		Sowohl der verunfallte Zug als auch der nicht verunfallte Zug fahren mit 200 km/h in den Tunnel ein, die Züge passieren die Tunnelportale gleichzeitig (keine Verzögerung). Der verunfallte Zug bremst bis zum Stillstand ab. Zwei Querschläge (2 CP) werden hinter dem Brandherd geöffnet, sobald der Zug anhält. Der nicht verunfallte Zug fährt mit voller Geschwindigkeit weiter. Die Belüftung beginnt, bevor die Querschläge geöffnet werden.
1b		X		Wie 1a, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug von 200 auf 40 km/h zum gleichen Zeitpunkt ab, an dem auch der verunfallte Zug bremst. Zwei Querschläge werden geöffnet, sobald der nicht verunfallte Zug den Bremsvorgang einleitet.
1c		X		Wie 1a/b, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug 30 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug den Bremsvorgang einleitet, von 200 auf 40 km/h ab. 2 CP wird geöffnet, wenn der verunfallte Zug stoppt, ungefähr 42 Sekunden, nachdem der nicht verunfallte Zug den Bremsvorgang einleitet. Dies stellt sich entsprechend dem realistischen Worst-Case-Szenario dar, da die Geschwindigkeit des nicht verunfallten Zuges verringert wird, wenn Querschläge geöffnet werden.
1d		X		Wie 1a/b/c, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug 30 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug angehalten hat, von 200 auf 40 km/h ab. 2 CP wird geöffnet, wenn der verunfallte Zug angehalten hat. <b>Worst-Case-Szenario.</b> Auf Basis der Unfall-Entscheidungszeitlinie muss der tatsächliche früheste Zeitpunkt für die Öffnung der Querpassagen mindestens 150 Sekunden später sein. Wegen der unmittelbaren Selbstrettung eines Fahrgastes (Person befolgt Anweisungen nicht) könnte der frühestmögliche Zeitpunkt ungefähr 40 Sekunden nach Anhalten des Zuges sein.
1e		X		Wie 1d, allerdings sind vier Querschläge geöffnet (4 CPs).
1f		X		Mögliches Worst-Case-Szenario. Wie 1d, allerdings sind 40 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug angehalten hat, die Querschläge geöffnet.
1g		X		Mögliches Worst-Case-Szenario. Wie 1f, allerdings sind zusätzliche Strahlventilatoren vorhanden und das Belüftungssystem nimmt den Betrieb auf, bevor die Querschläge geöffnet werden.
1h		X		<b>Referenz-Worst-Case-Szenario.</b> Wie 1d/f, allerdings sind 170 Sekunden, nachdem der verunfallte Zug angehalten hat, die Querschläge geöffnet. Dies basiert auf dem Zeitraum von 150 Sekunden zwischen dem Anhalten des verunfallten Zuges und der Erteilung der Evakuierungsanweisung. Weitere 20 Sekunden wurden hinzugerechnet, um die Zeit zu berücksichtigen, die erforderlich ist, um den Zug zu verlassen sowie einen Querschlag ausfindig zu machen und zu öffnen.
2a		X		Verunfallte Züge fahren mit 200 km/h in den Tunnel ein. Der verunfallte Zug bremst bis zum Stillstand ab. Nicht verunfallte Züge fahren in den Tunnel ein. Zwei Querschläge (2 CP) werden hinter dem Brandherd geöffnet, wenn der Zug anhält. Der nicht verunfallte Zug fährt mit voller Geschwindigkeit weiter.
2b		X		Wie 2a, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug von 200 auf 40 km/h ab.
3a		X		Nicht verunfallte Züge fahren mit 200 km/h in den Tunnel ein. Der verunfallte Zug fährt 140 Sekunden später ein und bremst bis zum Stillstand ab. Der nicht verunfallte Zug verlässt den Tunnel mit voller Geschwindigkeit. Zwei Querschläge (2 CP) werden hinter dem Brandherd geöffnet, wenn der verunfallte Zug anhält.
4a			X	Wie 1a mit Ausnahme der Lage des Brandherdes.
5a			X	Wie 4a, allerdings fährt der nicht verunfallte Zug mit 200 km/h in den Tunnel ein, während der verunfallte Zug den Bremsvorgang einleitet, und fährt mit voller Geschwindigkeit weiter.
5b			X	Wie 5a, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug hinter dem Unfallort von 200 auf 40 km/h ab.
6a	X			Wie 5a mit Ausnahme der Lage des Brandherdes. Unrealistisch als Zug.
6b	X			Wie 5b, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug von 200 auf 40 km/h ab, sodass er mit 40 km/h den Unfallort erreicht und passiert.
7a	X			Wie 6a, allerdings fährt der nicht verunfallte Zug 154 Sekunden vor dem verunfallten Zug ein; außerdem befindet er sich in der Mitte des Tunnels, wenn der verunfallte Zug den Bremsvorgang einleitet. Der nicht verunfallte Zug fährt mit 200 km/h weiter.

Szenario	Lage des Brandes			Beschreibung des Zugbetriebs
	Beginn	Mitte	Ende	
7b	X			Wie 7b, allerdings bremst der nicht verunfallte Zug von 200 auf 40 km/h ab, sodass er mit 40 km/h den Unfallort erreicht und passiert.

### 5.8 Zug-Aerodynamik

Bei einem 200 m langen Personenzug mit einer Reisegeschwindigkeit von 200 km/h wird im Normalbetrieb davon ausgegangen, dass er beim Durchfahren eines Tunnels einen Spitzenluftstrom von ungefähr 350 m<sup>3</sup>/s erzeugt. Bei einem Zuggtunnel mit einer Fläche von 34,5 m<sup>2</sup> entspricht dies einer Luftgeschwindigkeit von ungefähr 10 m/s. Mehrere Züge im Tunnel können zu einem höheren Luftstrom führen, obgleich im Normalbetrieb von nur einem Zug im Tunnel ausgegangen wird. Mehrere Züge im Tunnel würden den normalen Betrieb und den Verkehrsfluss beeinträchtigen, d. h., die Züge würden nicht mit Höchstgeschwindigkeit fahren. Der vom verunfallten Zug erzeugte Luftstrom wird im Abschnitt 6 „Ergebnisse“ erläutert und in Abbildung 5 gezeigt.

Es wurde eine Empfindlichkeitsstudie zum Tunnelquerschnitt durchgeführt (siehe Abschnitt 10.1), wobei die aktuelle Fläche von 34,5 m<sup>2</sup> mit dem vorherigen Wert von 38,5 m<sup>2</sup> verglichen wurde. Das Ergebnis der Analyse war ein leichter Rückgang des Luftstroms durch die offenen Querschläge aufgrund des geringeren Blockadeverhältnisses des Zuges, was zu einem geringfügig reduzierten Kolbeneffekt führt.

Alle Empfindlichkeitsstudien wurden ohne Lüftung und mit offenen Querschlägen, die sich öffneten, bevor unfallfreie Züge von 200 km/h auf 40 km/h abgebremst hatten, durchgeführt. Daraus ergaben sich konservative Schätzungen für den Vergleich. In der Praxis sind die Querschläge nicht geöffnet, bevor die Züge abgebremst haben und die Lüftung in Betrieb ist. Daher sind die nachfolgend beschriebenen Luftströme in den Querschlägen für das realistische Szenario nicht relevant.

Es wird darauf hingewiesen, dass die für diese Analyse angenommenen Oberflächenreibungs- und Luftwiderstandsbeiwerte nicht auf spezifischen Schienenfahrzeugen für den Tunnel basieren und daher nur einen Hinweis auf die in der Praxis zu erwartenden zugbedingten Luftströme und Druckdifferenzen geben. Entsprechend gestattet die relativ geringe Rauheit des Tunnels von 7 mm (führt zu einem  $f=0,02$ ) einen hohen Luftstrom im Tunnel. Mit dem Voranschreiten der Tunnelplanung werden exaktere Werte für die Aerodynamik der Schienenfahrzeuge zur Verfügung stehen. Dieser Analyse wurden moderat konservative Werte zugrunde gelegt.

Eine Empfindlichkeitsstudie der Aerodynamikparameter für Züge und Tunnel ist in Abschnitt 10.2 enthalten. Diese Analyse umfasst drei Parameter: den

Luftwiderstandsbeiwert der Fahrzeugfront, den Oberflächenreibungskoeffizienten und die Rauheit des Tunnels. Eine größere Wandrauheit führt aufgrund des Kolbeneffekts zu einem Rückgang der Spitzenluftströme in Tunnel und Querschlägen, während eine Zunahme des Oberflächenreibungsfaktors oder Luftwiderstandsbeiwertes des Zuges für einen Anstieg des Luftstroms sorgt. Es lässt sich schlußfolgern, dass der Zugoberflächenreibungsfaktor der kritische Parameter ist, da eine Verdopplung des Wertes zu einem Anstieg der Strömungsmenge im Tunnel um 28 % und durch die Querschläge um 50 % führt, während eine Zunahme des Luftwiderstandsbeiwertes von 0,3 auf 1 lediglich einen Anstieg der Strömungsmengen um 4 % in der Tunnelröhre und 7 % in den Querschlägen zur Folge hat. Dies ist logisch, da bei einem relativ langen Zug (200 m) der Oberflächenreibungsfaktor einen größeren Einfluss als der Luftwiderstandsbeiwert hat, da dieser sich lediglich auf die Frontpartie des Zuges bezieht. Ebenso ist die Zugoberflächenreibung wichtiger als die Zugquerschnittsfläche, die zusammen mit dem Luftwiderstandsbeiwert wirkt. In früheren Projektphasen wurde ein Querschnitt von 11 m<sup>2</sup> angenommen. Dies würde zu einer geringeren Blockade führen und einen leicht geringeren Kolbeneffekt zur Folge haben, d. h., die Annahmen für die vorliegende Druckanalyse wären weniger konservativ.

Zudem ist eine Empfindlichkeitsstudie mit einem nicht verunfallten Güterzug anstelle eines Personenzuges in Abschnitt 10.3 aufgeführt. Trotz des längeren und weniger aerodynamischen Zuges führt die geringere Einfahrtgeschwindigkeit von 140 km/h (gegenüber 200 km/h) zu einer deutlich geringeren Druckdifferenz zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre und somit zu geringeren Luftströmen in den Querschlägen im Worst-Case-Szenario.

Der von dem mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h fahrenden verunfallten Zug erzeugter Luftstrom ist identisch mit dem des unfallfreien Zuges, da die Tunnelröhren identisch sind. Es ist jedoch interessant, sich den Luftstrom und die Luftgeschwindigkeit in der Unfallröhre unmittelbar nach Halt des Zuges und vor der Öffnung der Querschläge anzusehen. Sobald der verunfallte Zug abbremst, reduziert sich der Luftstrom. Wenn der Zug zum Halten gekommen ist und die Querschläge geöffnet sind, ist der Luftstrom um etwa 120 m<sup>3</sup>/s gefallen. Dies entspricht einer Luftstromgeschwindigkeit in der Unfallröhre von 3,5 m/s zu Beginn der Evakuierung.

## **5.9 Rauchabführung und Lüftungskonzept**

Bei einem Brand im Tunnel wird mit der Lüftungsanlage eine kritische Luftstromgeschwindigkeit in der Unfallröhre erzeugt und aufrechterhalten. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von bis zu 2,6 m/s (je nach Zuggeometrie und Tunnelneigung) im Ringraum zwischen Zug und Tunnel. Dafür ist eine Strömungsmenge von 53 m<sup>3</sup>/s erforderlich.

Die Lüftungsanlage wird so ausgelegt, dass sie die kritische Luftstromgeschwindigkeit erreicht, selbst wenn mehrere Querschläge zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre geöffnet sind. Konkret sorgt die Lüftungsanlage dafür (mit einigen Vorbehalten hinsichtlich des Zugbetriebs), dass der Luftstrom in den Querschlägen von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre erfolgt, um dadurch eine Rauchausbreitung in die unfallfreie Tunnelröhre (dem vorgesehenen sicheren Bereich) zu verhindern.

Der Fokus dieser Anlage 3 zum Hauptdokument liegt auf der Untersuchung der Luftstromschwankungen, die zu Beginn eines Brandes auftreten können, wenn die Bewegung von Zügen in der unfallfreien Tunnelröhre bis zu und während der Evakuierung zu signifikanten Druckdifferenzen zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre führen kann. Diese anfänglichen Druckdifferenzen haben Luftstromschwankungen in der Anfangsphase einer Evakuierung zur Folge, die von der Lüftungsanlage geregelt werden müssen.

In dem Fall, dass ein nicht verunfallter Zug sich in Richtung Unfall bewegt (z. B. ein Zug bremst aufgrund einer Halteanweisung ab), kann der Druck in der unfallfreien Tunnelröhre gegenüber der Unfallröhre zunehmen. Bei geöffneten Querschlägen kann es möglich sein, dass die Luft von der unfallfreien Tunnelröhre in die Unfallröhre strömt. Dies würde verhindern, dass der Rauch sich in die unfallfreie Röhre ausbreitet. Jedoch ist eine Mindestgeschwindigkeit des Luftstroms in den Querschlägen erforderlich, um einen Rauchrückschlag entgegen der Strömungsrichtung und somit in die unfallfreie Röhre zu verhindern. Es wird darauf hingewiesen, dass der vorgesehene sichere Bereich bei einem Zugbrand die mittige Straßenröhre und nicht die unfallfreie Bahnöhre ist.

In dem Fall, dass ein nicht verunfallter Zug sich von der Unfallstelle Richtung Portal wegbewegt, kann der Sog des nicht verunfallten Zuges einen Unterdruck in der unfallfreien Röhre gegenüber der Unfallröhre erzeugen. Bei geöffneten Querschlägen kann es dann zu einem Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre kommen, der dafür sorgt, dass Rauch durch die offenen Querschläge in die unfallfreie Röhre gelangt.

Die Tunnellüftungsanlage und die Betriebsstrategie werden so konzipiert, dass negative Auswirkungen dieser Druckdifferenzen vermieden oder minimiert werden. Wie in den folgenden Analysen gezeigt (Abschnitte 5.10 und 5.11) ist es in den meisten Fällen möglich, den gewünschten Luftstrom von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre mit der erforderlichen Luftstromgeschwindigkeit zu erzielen.

Der erste Schritt war die Herstellung des schwankenden zugbedingten Druck- und Luftstromregimes bei Fehlen einer in Betrieb befindlichen Lüftungsanlage, d. h. die Bestimmung von Luftströmen vor einer Aktivierung der Lüftungsanlage, wie in der vorläufigen Strategie betrachtet.

### 5.10 **Worst-Case-Brandposition und Zugbetriebsszenario**

Von den 18 berücksichtigten Unfallszenarien wurde das Szenario 1h als das Worst-Case-Szenario ermittelt, bei dem:

- der verunfallte Zug in der Tunnelmitte zum Halt kommt,
- zeitgleich mit dem verunfallten Zug ein nicht verunfallter Zug in den Tunnel einfährt, oder
- 30 Sekunden nach Halt des verunfallten Zuges der nicht verunfallte Zug damit beginnt, von 200 km/h auf 40 km/h abzubremesen.
- Die Querschläge sind 170 Sekunden nach Halt des verunfallten Zuges geöffnet (150 Sekunden bis zur Evakuierungsanweisung zzgl. 20 Sekunden, bis die erste Person eine Tür öffnet).
- Die Lüftungsanlage wird schnellstmöglich vor Öffnung der Querschläge in Betrieb genommen.

Dabei wird von einer Reaktionszeit von 30 Sekunden nach Auslösen des Alarms durch den im Tunnel liegende Zug ausgegangen. Der nicht verunfallte Zug wurde bis zur Öffnung der Querschläge auf 40 km/h abgebremst.

Wenn der Querschlag geöffnet wird, bevor der nicht verunfallte Zug 40 km/h erreicht hat, wird ein kurzzeitiger Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre erzeugt. Je schneller die Querschläge offen sind, um so höher ist der unerwünschte Luftstrom. In diesem Fall wird der Luftstrom in den Querschlägen reduziert und die Strömungsrichtung gewechselt, sobald der nicht verunfallte Zug 40 km/h erreicht hat. Der Luftstrom durch die Querschläge wird dann von der Lüftungsanlage geregelt.

### 5.11 **Lüftungsstrategie**

Die berücksichtigten Lüftungsoptionen werden in den folgenden Abschnitten betrachtet.

Die Lüftungsoptionen wurden für das Worst-Case-Planungsszenario 1h sowie für die Variationen 1d, 1e, 1f und 1g betrachtet.

In dieser Studie wurden unterschiedliche Strategien sowie verschiedene Strahlventilator-Konfigurationen/Positionen untersucht. Bei der Modellierung wurden Gruppen von je drei Strahlventilatoren mit einem Abstand von 70-80 m zwischen den einzelnen Ventilatoren und einem Abstand von 2,2 und 4,4 km zwischen den jeweiligen Gruppen entlang der gesamten Länge der beiden Röhren (Unfallröhre und unfallfreie Röhre) zugrunde gelegt. Der Konstrukteur, d.h. der Auftragnehmer, der Lüftungsanlage muss die optimale Verteilung der Ventilatoren in Bezug auf Resilienz ermitteln.

In allen Szenarien kommen Strahlventilatoren zum Einsatz, um den Druck in der unfallfreien Röhre zu erhöhen, damit sie weniger durch die Unfallröhre beeinträchtigt wird. Die Ventilatoren zwischen dem Tunnelausgangsportal der unfallfreien Tunnelröhre und dem Brandherd werden entgegen der Fahrtrichtung (und Luftstromrichtung) betrieben, um den Luftstrom und den Druckabfall in der unfallfreien Röhre zu reduzieren. Die Ventilatoren zwischen dem Brandherd und dem Tunneleingangsportal der unfallfreien Tunnelröhre werden in Fahrtrichtung (und Luftstromrichtung) betrieben, um den Druck in der unfallfreien Röhre zu erhöhen und zusätzliche Luft von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre durch die Querschläge zu befördern.

Die für die Unfallröhre vorgesehene Strategie ist eine einfache „Pull“-Strategie (wie in Abbildung 4 gezeigt), bei der Strahlventilatoren in der Unfallröhre hinter dem Brandherd in Fahrtrichtung (und Luftstromrichtung) betrieben werden. Dadurch kommt es zu einem Unterdruck hinter dem Brandherd, der Luft von der unfallfreien Röhre über die Querschläge zieht. Die Strahlventilatoren vor dem Brandherd sind absichtlich nicht in Betrieb, da sie den Rauch verteilen, den Druck erhöhen und einen Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre begünstigen würden, was unerwünscht ist.

Weitere aus Gründen der Vollständigkeit und zu ihrem expliziten Ausschluß untersuchte Strategien in der Unfallröhre sind die „Pull-Pull“- und „Push-Pull“-Optionen. Die „Pull“-Strategie wurde als den anderen Optionen überlegen ermittelt, da sie in der Lage ist, die kritische Luftstromgeschwindigkeit in der Unfallröhre zu erzielen und die Auswirkungen der Luftstromschwankungen in den Querschlägen zu reduzieren.

In der „Push-Pull“-Strategie (Abbildung 5) wurden Strahlventilatoren in der Unfallröhre zudem vor dem Brandherd in Fahrtrichtung betrieben. Diese Konfiguration sorgt zwar für die kritische Luftstromgeschwindigkeit, jedoch werden unerwünschte kurzzeitige Luftströme von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre über die Querschläge nicht reduziert.

In der „Pull-Pull“-Strategie (Abbildung 6) wurden Strahlventilatoren in der Unfallröhre vor dem Brandherd entgegen der Fahrtrichtung mit dem Ziel betrieben, den vorderen Luftstrom in der Tunnelröhre umzukehren und zusätzliche Luft über die Querschläge zu ziehen. Bei dieser Konfiguration wird jedoch die kritische Geschwindigkeit nicht erreicht.

Alle untersuchten Strategien im Überblick:

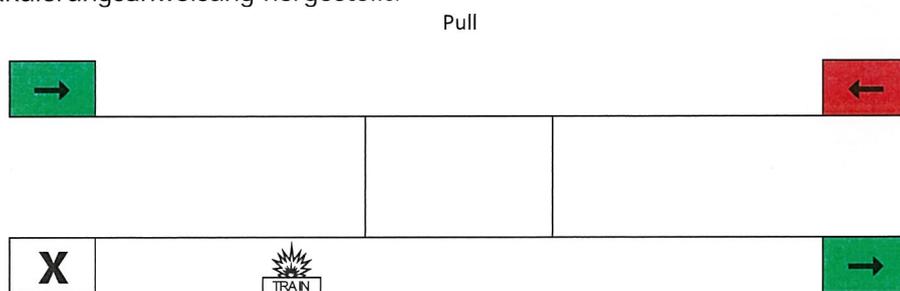
- **S<sub>0</sub>: 3 Ventilatoren alle 2,2 km – Pull (nur Ziehen von Luft hinter Brandherd)**

- S<sub>1</sub>: 3 Ventilatoren an 3 verschiedenen Positionen: Tunnelanfang, Tunnelmitte und Tunnelende (Pull-Pull)
- S<sub>2</sub>: 3 Ventilatoren alle 4,4 km – Pull-Pull
- S<sub>3</sub>: 3 Ventilatoren alle 2,2 km – Pull-Pull
- S<sub>4</sub>: 3 Ventilatoren an 3 verschiedenen Positionen: Tunnelanfang, Tunnelmitte und Tunnelende (Push-Pull)
- S<sub>5</sub>: 3 Ventilatoren alle 4,4 km – Push-Pull
- S<sub>6</sub>: 3 Ventilatoren alle 2,2 km – Push-Pull
- S<sub>7</sub>: 12 Ventilatoren in Betrieb nach den ersten 1,2 km ab dem Tunnelportal im Abstand von jeweils 110 m – Pull (nur Ziehen von Luft hinter Brandherd)

Es wird angemerkt, dass die Lüftungsanlage schnellstmöglich aktiviert werden sollte. Konkret heißt das, dass die Lüftungsanlage mit voller Leistung laufen muss, **bevor** die Türen der Querschläge geöffnet werden.

Die Anlaufzeit für Strahlventilatoren bis zur Volldrehzahl beträgt in der Regel 15 Sekunden. Die von einem Strahlventilator erzeugte Druckwelle breitet sich mit Schallgeschwindigkeit (340 m/s) aus. Bei einem Tunnel mit 18.000 m Länge bedeutet dies eine maximale Zeit von 53 Sekunden bis zur Herstellung des Druckregimes in den Röhren (unter Annahme von Strahlventilatoren nur an den Portalen). In der Praxis befinden sich die Strahlventilatoren entlang der gesamten Röhrenlänge, wodurch das Druckregime in kurzer Zeit hergestellt wird. Daher handelt es sich um eine konservative Annahme, dass die Lüftungsanlage bis zu 60 Sekunden benötigt, um das erforderliche Druckregime zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre herzustellen.

Es empfiehlt sich, die Lüftungsanlage unmittelbar nach Halt des verunfallten Zuges und Auslösung des Alarms zu aktivieren. Die erforderlichen Drücke werden etwa 90 Sekunden vor der vom Zug erteilten Evakuierungsanweisung hergestellt.



**Abbildung 4 – „Pull“-Lüftung (S0). Strahlventilatoren hinter dem Brandherd betrieben in Fahrtrichtung. Strahlventilatoren vor dem Brandherd betrieben entgegen der Fahrtrichtung. Das Ziel ist eine Reduzierung des Druckes in der Unfallröhre relativ zur unfallfreien Röhre.**

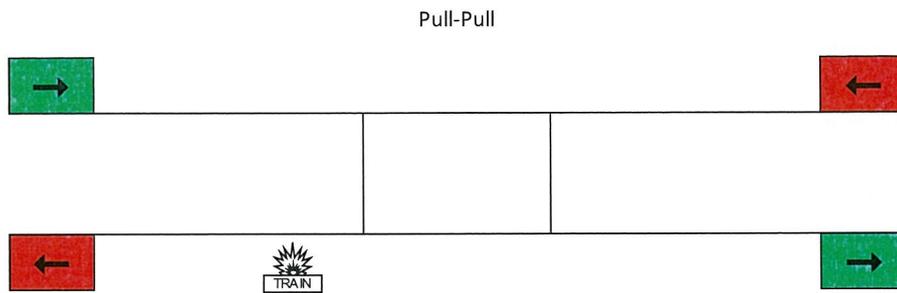


Abbildung 5 – „Pull-Pull“-Lüftung (S1-3). Strahlventilatoren hinter dem Brandherd betrieben in Fahrrichtung. Strahlventilatoren vor dem Brandherd betrieben entgegen der Fahrrichtung. Das Ziel ist eine Reduzierung des Druckes in der Unfallröhre relativ zur unfallfreien Röhre.

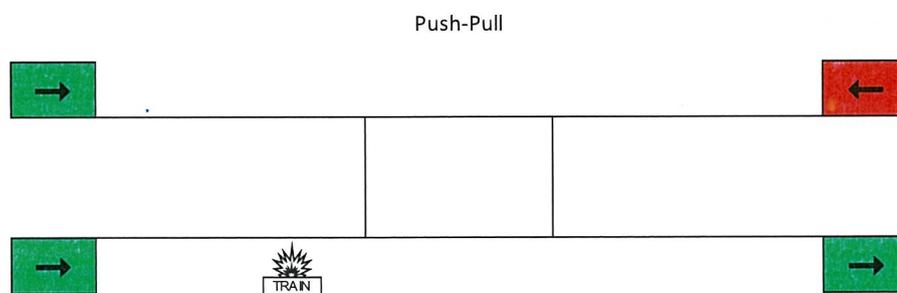


Abbildung 6 – „Push-Pull“-Lüftung (S1-6). Strahlventilatoren hinter dem Brandherd betrieben in Fahrrichtung. Strahlventilatoren vor dem Brandherd betrieben entgegen der Fahrrichtung. Das Ziel ist eine Reduzierung des Druckes in der Unfallröhre relativ zur unfallfreien Röhre.

## 6. Ergebnisse – Notfallszenarien

In den folgenden Abschnitten werden die detaillierten Luftstromergebnisse der eindimensionalen Schwankungsanalyse für eine Reihe von Zugbetriebs- und Brandszenarien erläutert. Die Ergebnisse werden nur für das identifizierte realistische Worst-Case-Szenario (1h) und Variationen davon dargelegt.

### 6.1 Schiene/Schiene

Die Zeitachse für jedes Brandszenario ist in Tabelle 2 einschließlich Einzelheiten zum Betrieb der Züge sowohl in der Unfallröhre als auch in der unfallfreien Röhre dargestellt. Szenario 1h wurde als das realistischste Worst-Case-Szenario ermittelt und zuvor in Abschnitt 5.10 betrachtet, gefolgt von einem Vorschlag für eine geeignete Lüftungsoption in Abschnitt 5.11.

Die in diesem Abschnitt dargelegten Ergebnisse schließen Simulationen mit und ohne Betrieb der Lüftungsanlage ein, um die Auswirkung der

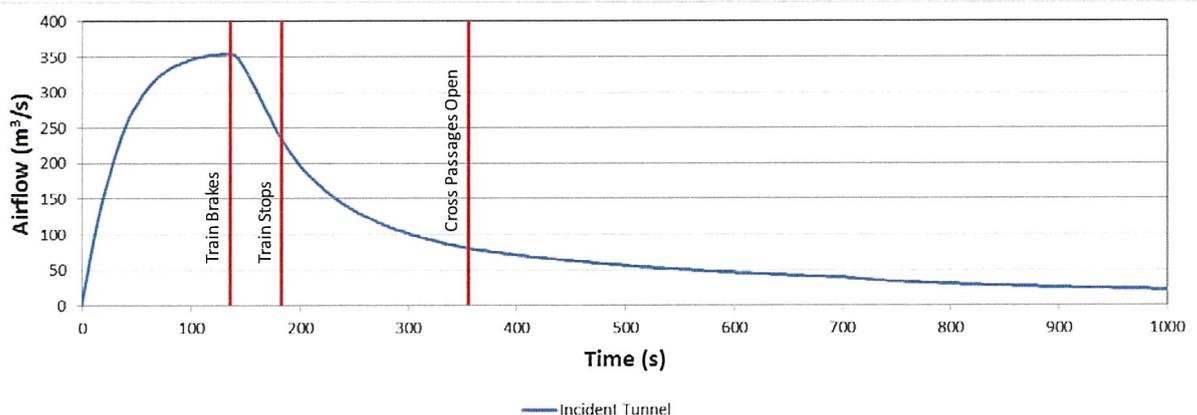
Lüftungsstrategie zu demonstrieren. In allen dargelegten Simulationen wurden nur zwei Querschläge geöffnet (außer in Szenario 1e, bei dem vier Querschläge offen sind). Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Querschlägen beträgt 110 m, wie in der Ausschreibungsplanung definiert.

Die positive Luftstromrichtung in den Querschlägen ist definiert als Luftstrom von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre. Um einen negativen Luftstrom in den Querschlägen handelt es sich folglich bei einem Luftstrom zur unfallfreien Röhre, was ein unerwünschtes Ereignis ist, das es zu vermeiden gilt. Daher wurde jedes Szenario mit einem negativen Luftstrom bei geöffneten Querschlägen neu modelliert, um die erforderliche Lüftungsoption mithilfe von Strahlventilatoren zu ermitteln und zu zeigen, dass diese die Rauchausbreitung von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre verhindert.

### 6.1.1 Luftstrom in Unfalltunnelröhre – Realistisches Worst-Case-Szenario

Der von einem Zug in der Unfallröhre erzeugte Luftstrom ohne aktivierte Lüftungsanlage wird in Abbildung 8 gezeigt. Der Zug fährt mit 200 km/h zur Zeit  $t = 0$  in den Tunnel ein, bremst dann nach ca. 130 Sekunden und kommt in der Tunnelmitte nach 185 Sekunden zum Halt. Der Luftstrom erreicht einen Spitzenwert von  $355 \text{ m}^3/\text{s}$  und fällt dann stetig ab, während der Zug bremst und schließlich anhält. Wenn die Türen der Querschläge geöffnet sind, sinkt der Luftstrom noch weiter, bis er unter den erforderlichen kritischen Luftstrom von  $53 \text{ m}^3/\text{s}$  gesunken ist.

Der Effekt der Lüftungsstrategie ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Anwendung der  $S_0$ -Strategie („Pull“) stabilisiert den Luftstrom in der Unfallröhre auf etwa  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , also oberhalb des erforderlichen kritischen Luftstroms.



**Abbildung 7 – Luftstrom in der Unfallröhre in einem Abschnitt vor dem Brandherd ohne in Betrieb befindliche Lüftungsanlage. Der Luftstrom fällt kontinuierlich während der Simulation.**

Airflow	Luftstrom
Train brakes	Zug bremst
Train stops	Zug stoppt
Cross Passages open	Querschläge öffnen
Time	Zeit
Incident Tunnel	Unfallröhre

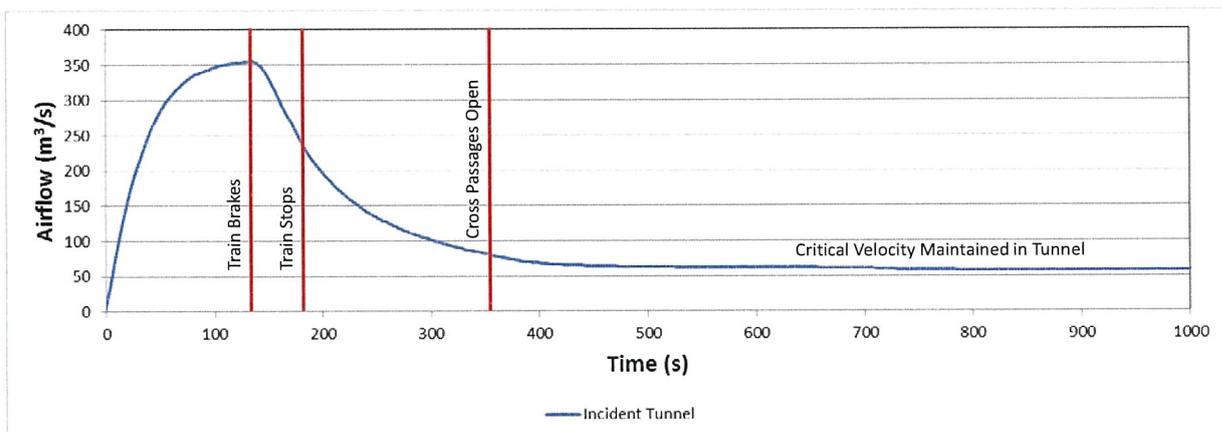


Abbildung 8 – Luftstrom in der Unfallröhre in einem Abschnitt vor dem Brandherd mit in Betrieb befindlicher Lüftungsanlage gemäß der „Pull“-Strategie S<sub>0</sub>. Aufgrund der aktivierten Lüftung fällt der Luftstrom nicht unter 50 m<sup>3</sup>/s. Die Lüftungsanlage wird nach dem Halt des Zuges aktiviert.

Airflow	Luftstrom
Train brakes	Zug bremst
Train stops	Zug stoppt
Cross Passages open	Querschläge öffnen
Time	Zeit
Incident Tunnel	Unfallröhre
Critical Velocity maintained in tunnel	Kritische Luftstromgeschwindigkeit in Tunnel sichergestellt

6.1.2 Luftstrom in Querschlägen – Realistisches Worst-Case-Szenario  
 Der Luftstrom in den offenen Querschlägen im „Realistischen Worst-Case-Szenario“ (1h) wird in Abbildung 10 gezeigt. Das Szenario gibt die erwarteten Luftströme ohne aktivierte Lüftungsanlage an. Dasselbe Szenario mit aktivierter Lüftungsanlage wird in Abbildung 11 gezeigt.

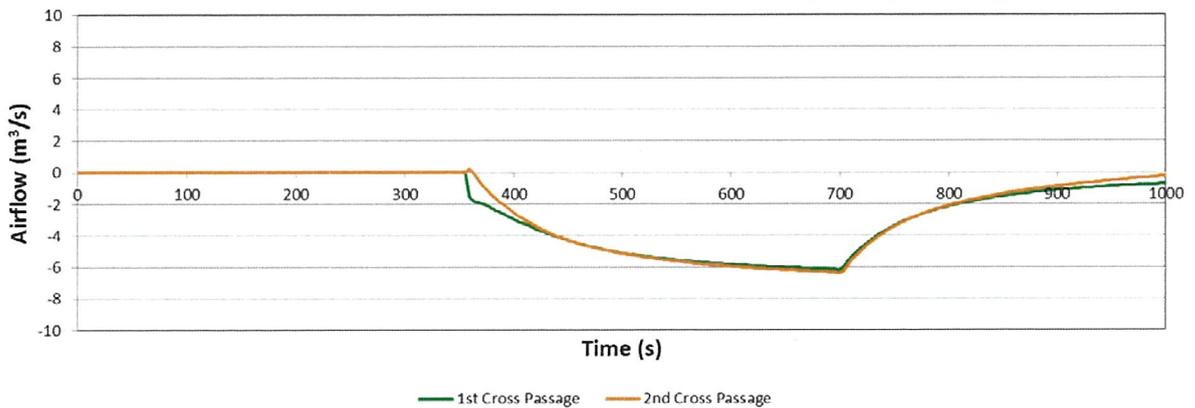
Die Querschläge werden in der Simulation in beiden Fällen nach 355 Sekunden geöffnet (170 Sekunden nach Halt des verunfallten Zuges).

Ohne Lüftung (Abbildung 10) zieht der mit 40 km/h fahrende unfallfreie Zug Luft aus der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre, was unerwünscht ist.

Mit in Betrieb befindlicher Lüftung gemäß der „Pull“-Strategie (Abbildung 11) ist der Luftstrom durch die Querschläge stets von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre gerichtet: bevorzugte Luftstromrichtung. Wenn die Türen geöffnet sind, steigt der Luftstrom sukzessive über einen Zeitraum von 120 Sekunden auf einen Maximalwert von 14 m<sup>3</sup>/s pro Querschlag an, dies entspricht einer Luftstromgeschwindigkeit von 4,7 m/s in jedem 3 m<sup>2</sup> großen Querschlag. Der Sprung beim Luftstrom nach 700 Sekunden in der Simulation tritt auf, wenn der unfallfreie Zug den Tunnel verlässt.

Dies belegt, dass es mithilfe der Lüftungsanlage möglich ist, einen erforderlichen Luftstrom von mehr als 2 m/s zu erzeugen, um einen Raucherückschlag in die Querschläge zu verhindern.

Zudem belegt die Simulation, dass die Lüftungsanlage vor dem Öffnen der Türen der Querschläge in Betrieb genommen werden sollte, um ein günstiges Druckregime herzustellen und einen Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre zu vermeiden.



**Abbildung 9 – Luftstrom in den Querschlägen in Szenario 1h „Realistisches Worst-Case-Szenario“ ohne Lüftung. Die Querschläge werden nach 355 Sekunden geöffnet. Die Änderung des Luftstroms nach 700 Sekunden wird durch das Hinausfahren des unfallfreien Zuges aus dem Tunnel verursacht.**

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

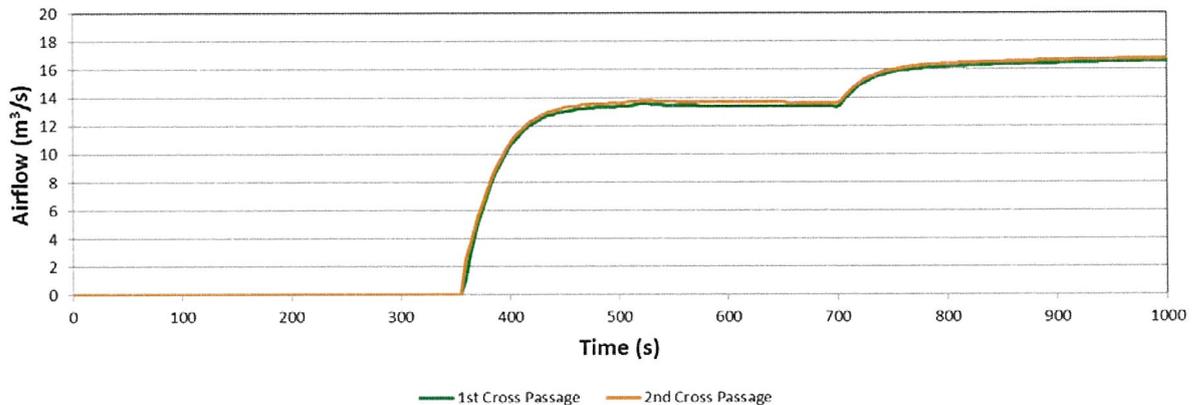


Abbildung 10 – Luftstrom in den Querschlägen in Szenario 1h „Realistisches Worst-Case-Szenario“ mit „Pull“-Lüftung. Die Lüftungsanlage wird nach dem Halt des Zuges und vor Öffnung der Querschläge nach 355 Sekunden aktiviert. Der Anstieg des Luftstroms nach 700 Sekunden wird durch das Hinausfahren des unfallfreien Zuges aus dem Tunnel verursacht.

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

### 6.1.3

#### Einfluss der Querschlag-Öffnungszeiten

Es wurden mehrere Simulationen durchgeführt, um den Einfluss einer früheren Öffnung der Querschläge – aus welchem Grund auch immer –, zu untersuchen. Diese Simulationen ergaben konservativere Szenarien als das realistische Worst-Case-Szenario. Wenn die Querschläge geöffnet werden, bevor der unfallfreie Zug auf 40 km/h abgebremst ist, bildet sich ein Unterdruck hinter dem unfallfreien Zug.

Die Ergebnisse von Szenario 1f sind dargestellt in Abbildung 12. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass die Querschläge bereits 42 Sekunden nach dem Halt des verunfallten Zuges geöffnet werden. Zu diesem Zeitpunkt bremst der unfallfreie Zug gerade einmal seit 12 Sekunden, weswegen er noch immer eine Geschwindigkeit von etwa 150 km/h hat, wenn die Türen der Querschläge geöffnet werden. Der Unterdruck hinter dem Zug würde einen unerwünschten kurzzeitigen (10-20 Sekunden) Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre mit einem Spitzenwert von weniger als 5 m³/s erzeugen. Auch wenn es sich um eine unrealistische Situation handelt, besteht die Gefahr einer schnellen Rauchausbreitung von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre durch den Luftstrom (siehe Abschnitt 6.1.4 unten).

Es ist hervorzuheben, dass es sich um ein unrealistisches Szenario handelt, da die Reisenden den Zug bereits innerhalb von Sekunden nach Halt des

Zuges und noch vor einer Evakuierungsanweisung verlassen. Die einzige Situation, in der so etwas geschehen könnte, wäre, wenn das Bremssignal verzögert wäre und der unfallfreie Zug noch über 40 km/h schnell fahren würde.

Es wird darauf hinzuweisen, dass der kritische Parameter nicht die zeitliche Verzögerung zwischen dem Halt des verunfallten Zuges und der Öffnung der Querschläge ist, sondern die Zeit zwischen dem Notbremssignal und der Öffnung der Querschläge.

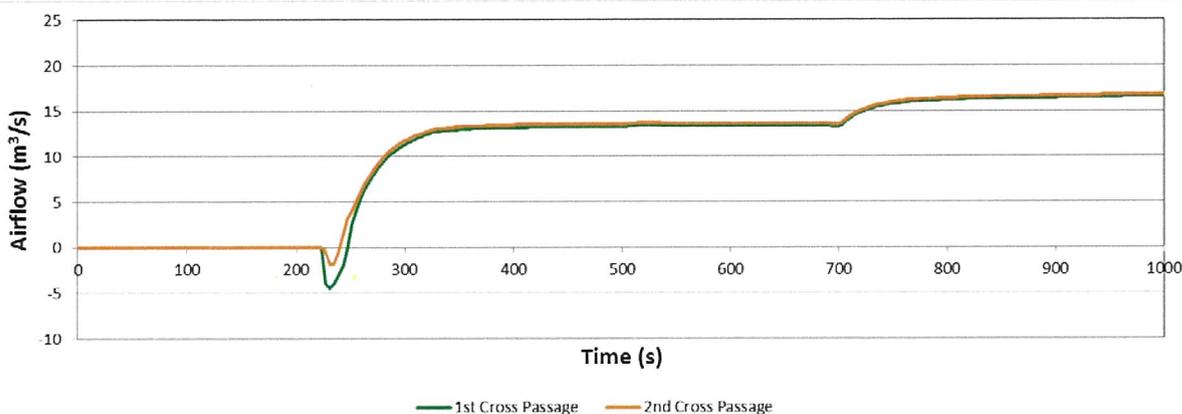


Abbildung 11 – Luftstrom in den Querschlägen in Szenario 1f mit „Pull“-Lüftung. Die Querschläge öffnen sich frühzeitig, 42 Sekunden nach Halt des verunfallten Zuges, d. h. nach 220 Sekunden im Diagramm. Die Lüftung wird in Betrieb genommen, bevor die Querschläge offen sind.

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

#### 6.1.4 Luftströme in der unfallfreien Tunnelröhre

Der in der unfallfreien Röhre durch die Bewegung des unfallfreien Zuges und die Lüftungsanlage erzeugte Luftstrom ist in Abbildung 13 dargestellt. Zum Zeitpunkt der Öffnung der Querschläge in der Simulation ( $t = 355$  s) beträgt der Luftstrom etwa  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  in Fahrtrichtung des Zuges. Dies entspricht einer Luftstromgeschwindigkeit von  $3,5 \text{ m/s}$  in der Unfallröhre. Der Luftstrom fällt ab auf  $90 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2,6 \text{ m/s}$ ), wenn der unfallfreie Zug den Tunnel verlässt.

Wenn aus irgendeinem Grund (extreme und unrealistische Umstände) die Querschläge geöffnet werden, bevor ein unfallfreier Zug eine Geschwindigkeit von  $40 \text{ km/h}$  erreicht, zieht der große Luftstrom schnell

Luft in die unfallfreie Tunnelröhre. Beispielsweise könnte ein 10 Sekunden dauernder unerwünschter Luftstrom in den Querschlägen für eine starke Rauchausbreitung über eine Länge von bis zu 35 m sorgen. Es würde weitere 10 Sekunden dauern, bis die rauchgefüllte Luft durch Frischluft verdrängt wäre.

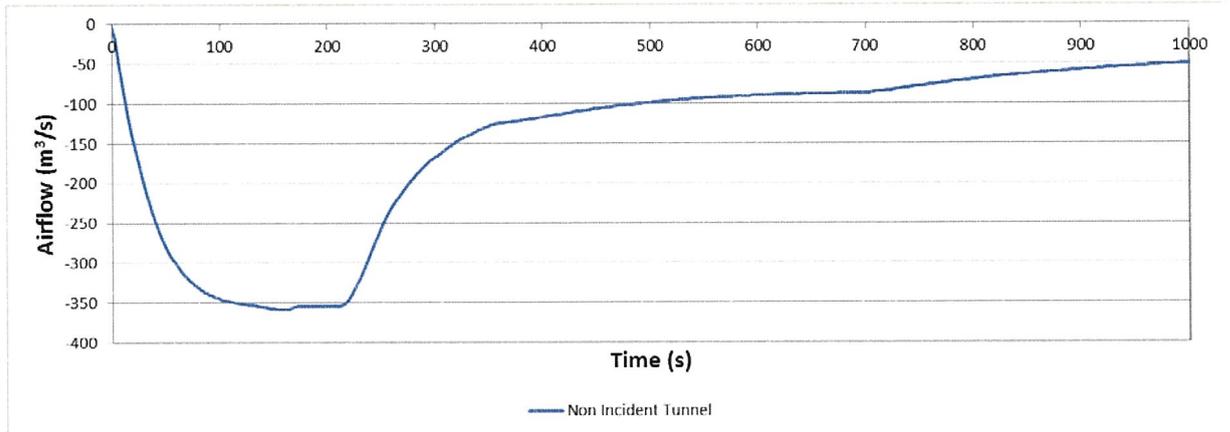


Abbildung 12 – Luftstrom in der unfallfreien Tunnelröhre mit in Betrieb befindlicher Lüftungsanlage gemäß „Pull“-Strategie. Der Luftstrom ist in Fahrtrichtung des unfallfreien Zuges.

Airflow	Luftstrom
Time	Zeit
Non Incident Tunnel	Unfallfreie Röhre

## 6.2 Schiene/Straße

Die zur Durchführung der Simulationen verwendete SES-Software gestattet ohne weiteres keine Simulation des Straßenverkehrs. Jedoch kann diese Situation mithilfe eines Zugverkehrsstroms, dessen Abmessungen und aerodynamische Parameter einem durchschnittlichen Pkw/Lkw-Verkehrsstrom entsprechen, modelliert werden.

Diese Methode wurde für die vorliegende Studie gewählt. Die Verkehrsparameter stammen von vorangegangenen Dauerzustandsstudien, wobei die konservativsten Werte basierend auf Verkehrsprognosen für das Jahr 2038 für die Analyse gewählt wurden.

Basierend auf dem Luftwiderstandsbeiwert für einen Pkw und einen Lkw und deren Anteil am Verkehr haben wir einen „äquivalenten Zug“ modelliert, der die entsprechenden Verkehrseigenschaften besitzt. Wenn der verunfallte Zug in den Tunnel einfährt, wird angenommen, dass bereits ein konstanter Verkehrsstrom in der unfallfreien Straßenröhre existiert.

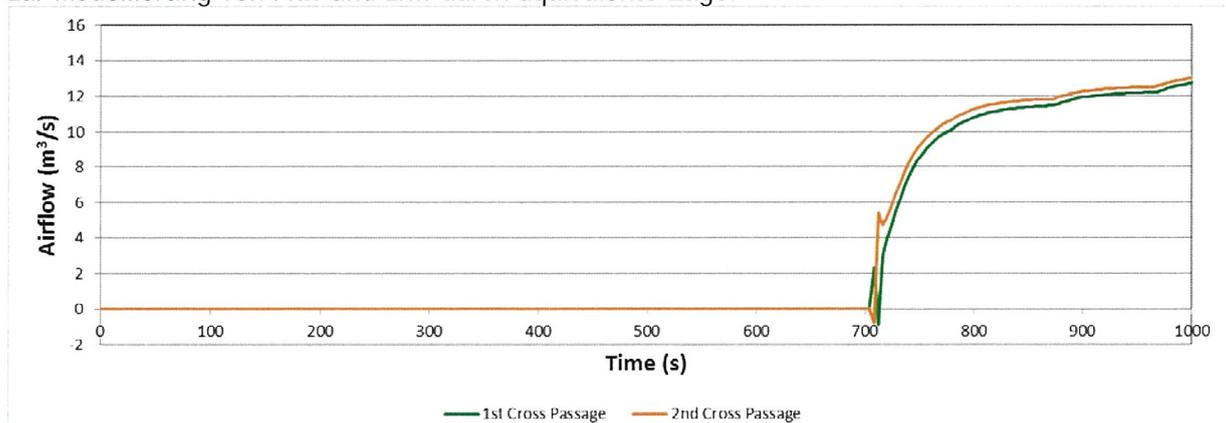
In dem untersuchten Szenario werden alle Pkw hinter dem Unfallort angewiesen, ihre Geschwindigkeit auf 70 km/h (von 110 km/h) zu

reduzieren, während die Fahrzeuge vor dem Unfallort zum Halt aufgefordert werden.

Bei allen Fahrzeugen wird davon ausgegangen, dass sie 30 Sekunden nach dem Halt des verunfallten Zuges mit dem Bremsvorgang beginnen.

Die Lüftung in dem Szenario mit einer Evakuierung aus der inneren Bahnöhre in die innere Straßenöhre erfolgt gemäß der „Pull“-Strategie wie im Schiene/Schiene-Fall. Die Strahlventilatoren werden in Betrieb genommen, um in der unfallfreien Straßenöhre einen höheren Luftdruck aufzubauen, während die Strahlventilatoren hinter dem Brandherd dazu dienen, den Luftdruck in der Unfallbahnöhre zu reduzieren. Die Straßenöhre verfügt über die gleiche Anzahl an Strahlventilatoren wie die Bahnöhren, jedoch kann jeder Ventilator eine größere Nennschubkraft erzeugen (1.400 N gegenüber 750 N). Dadurch ist es möglich, für eine ausreichende Druckbeaufschlagung in der Straßenöhre zu sorgen. Der Hauptaspekt bei der Konzeption der Straßenöhrenventilation ist die Verdünnung der Auspuffgase und nicht die Druckbeaufschlagung in der inneren Straßenöhre während der Evakuierung aus den Bahnöhren. Die Strahlventilatoren zur Erhöhung des Luftdrucks in der Straßenöhre (bei einem Brand in einer Bahnöhre) werden umgehend nach dem Halt des verunfallten Zuges und der Auslösung des Alarms in Betrieb genommen: Es gilt dabei dieselbe Lüftungsstrategie wie für die Druckbeaufschlagung in der unfallfreien Bahnöhre.

Wenn die Querschläge geöffnet sind (700 Sekunden in der Simulation), erfolgt der Luftstrom von der unfallfreien Tunnelöhre zur Unfallöhre. Die „Rauheit“ der Luftstromkurve hat ihre Ursache in der Natur der Modellierung eines konstanten Verkehrsstroms mit langen Zügen mit ähnlichen aerodynamischen Parametern. Der vernachlässigbare negative Anfangsluftstrom ist kein echter Strom, sondern ein Artefakt des Ansatzes zur Modellierung von Pkw und Lkw durch äquivalente Züge.



**Abbildung 13 – Luftstrom in den Querschlägen bei einem Brand in einer Bahnöhre mit Evakuierung direkt in die Straßenöhre. Der verunfallte Zug stoppt nach etwa 530 Sekunden in der Simulation. Die Simulation wurde eine Zeit lang vor dem Unfall begonnen, um die unfallfreie Tunnelöhre mit „Pkw/Lkw“ (äquivalente Züge) zu füllen. Es dauert weitere 170 Sekunden, bevor die Querschläge nach insgesamt 700 Sekunden**

in der Simulation geöffnet sind. Die Lüftungsanlage wird in der „Pull“-Strategie betrieben.

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

### 6.3 Annahmen und Erläuterungen zu den Berechnungen

Die Analyse wurde mithilfe der Subway Environmental Simulation (SES)-Software durchgeführt. Für das Modell wurden zwei parallele Strecken und zwei Querschläge zugrunde gelegt. Nur in einem Szenario wurde der Luftstrom bei vier geöffneten Querschlägen untersucht. In allen anderen Szenarien sind nur zwei Querschläge offen.

Die Simulationen wurden in zwei Teilen durchgeführt. Die erste Simulation beginnt, bevor die Züge in den Tunnel einfahren und stellt sicher, dass sie mit der richtigen Geschwindigkeit einfahren und zum erforderlichen Zeitpunkt mit dem Bremsvorgang beginnen. In dieser Simulation sind die Querschläge geschlossen. Die zweite und finale Simulation beginnt, wenn der verunfallte Zug stoppt und die Querschläge geöffnet werden. Der Brand beginnt somit unmittelbar zu Beginn dieser Simulation. Die Ergebnisse der ersten Simulation dienen als Ausgangsbedingungen für die zweite Simulation.

### 6.4 Druckschwankungsverläufe

Um den Einfluss der Lüftungsstrategie auf den relativen Druck zwischen der Unfallröhre und der unfallfreien Röhre zu demonstrieren, wurden Druck-Weg-Profile für verschiedene Zeitpunkte in der Simulation erstellt.

In Abbildung 15 ist der Druck nach dem Halt des verunfallten Zuges aber vor Beginn des Bremsvorgangs beim unfallfreien Zug angegeben. Die Querschläge sind zu diesem Zeitpunkt geschlossen. Dies belegt der große Unterdruck (-2.500 Pa) hinter dem unfallfreien Zug, der zu einer Druckdifferenz von etwa -1.500 Pa zwischen den zwei Tunnelröhren am Brandort und der Position der Querschläge führt. Es ist zu beachten, dass die Blockade durch den verunfallten Zug und die Verlangsamung des Luftstroms in der Unfallröhre für einen geringeren Druckaufbau hinter dem verunfallten Zug sorgt. Die verschiedenen Druckskalen sollen beachtet werden.

In Abbildung 16 ist der Druck angegeben, nachdem der unfallfreie Zug seine Geschwindigkeit auf 40 km/h reduziert hat, aber bevor die Querschläge geöffnet sind und die Lüftungsanlage aktiviert ist. Der Unterdruck hinter dem unfallfreien Zug ist auf -50 Pa gefallen. An dem

Brandort und der Position der Querschläge herrscht eine Druckdifferenz von -10 bis -30 Pa zwischen den beiden Röhren vor. Dieser geht auf die geringere Geschwindigkeit des unfallfreien Zuges zurück.

Der Effekt der „Pull“-Lüftungsstrategie ist in Abbildung 17 dargestellt. Der Betrieb der Strahlventilatoren hinter der Brandposition führt zu einem Druck von -20 Pa direkt am Brandherd und -40 Pa an der Zugspitze. Die Strahlventilatoren zur Druckbeaufschlagung in der unfallfreien Tunnelröhre führen zu einem Überdruck von +80 Pa am Brandort. Dies ergibt eine Gesamtdruckdifferenz von +100 Pa und führt zu einem Luftstrom von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre, der die Ausbreitung von Rauch in die Querschläge verhindert.

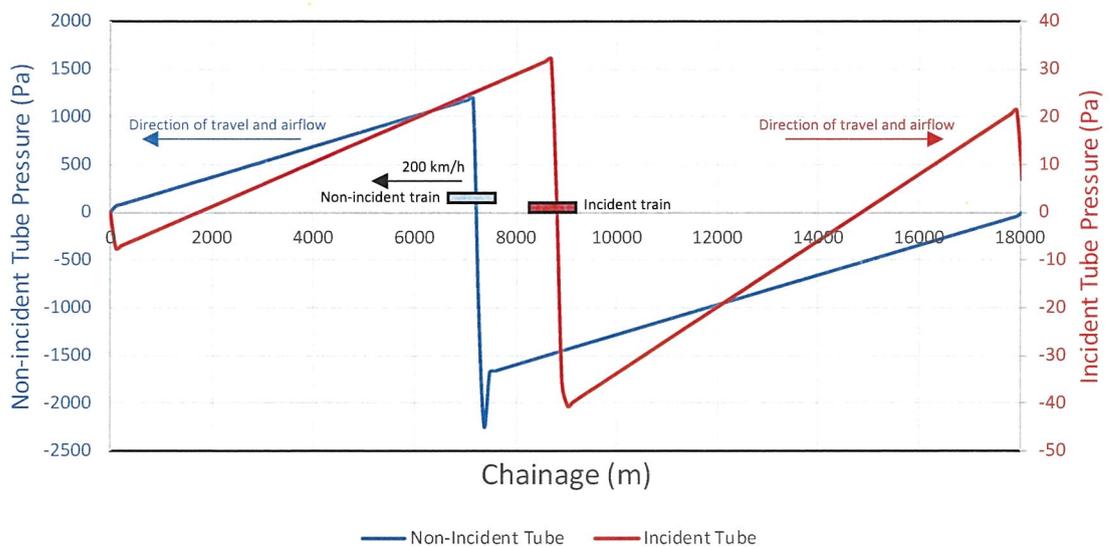


Abbildung 14 – Druckverlauf in der Unfallröhre (rot) und der unfallfreien Röhre (blau) vor der Abbremsung des unfallfreien Zuges. Die Skala für den Druck in der Unfallröhre ist für eine bessere Darstellung vergrößert. Der verunfallte Zug steht bei 8.700 m und die Querschläge sind geschlossen. Der nicht verunfallte Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h und hat gerade den Unfallort passiert (Position bei 7.000 m). Die Lüftungsanlage ist noch nicht in Betrieb.

Non-incident Tube pressure	Druck in unfallfreier Röhre
Direction of travel and airflow	Fahrt-/Luftstromrichtung
Non-incident train	Unfallfreier Zug
Incident Train	Verunfallter Zug
Chainage	Verkettung
Non-incident Tube	Unfallfreie Röhre
Incident Tube	Unfallröhre

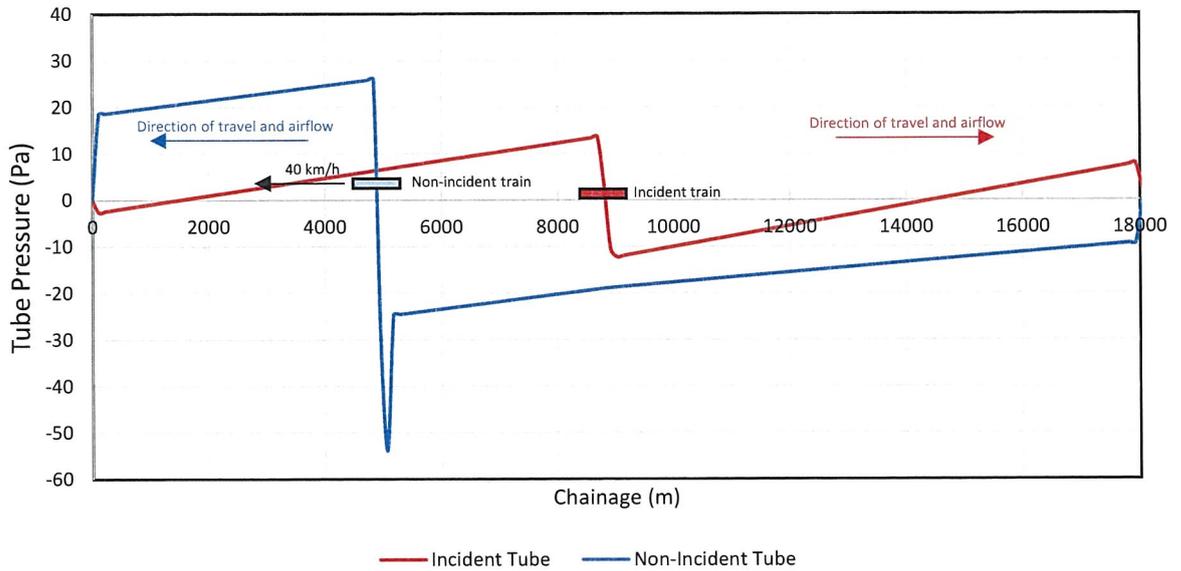


Abbildung 15 – Druckverlauf in der Unfallröhre (rot) und der unfallfreien Röhre (blau) nach der Abbremsung des unfallfreien Zuges. Der verunfallte Zug steht und die Querschläge sind geschlossen. Der nicht verunfallte Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h (Position bei 5.000 m). Die Lüftungsanlage ist noch nicht in Betrieb (um die Auswirkung der geringeren Geschwindigkeit des unfallfreien Zuges zu demonstrieren).

Tube pressure	Druck in Röhre
Direction of travel and airflow	Fahrt-/Luftstromrichtung
Non-incident train	Unfallfreier Zug
Incident Train	Verunfallter Zug
Chainage	Verkettung
Non-incident Tube	Unfallfreie Röhre
Incident Tube	Unfallröhre

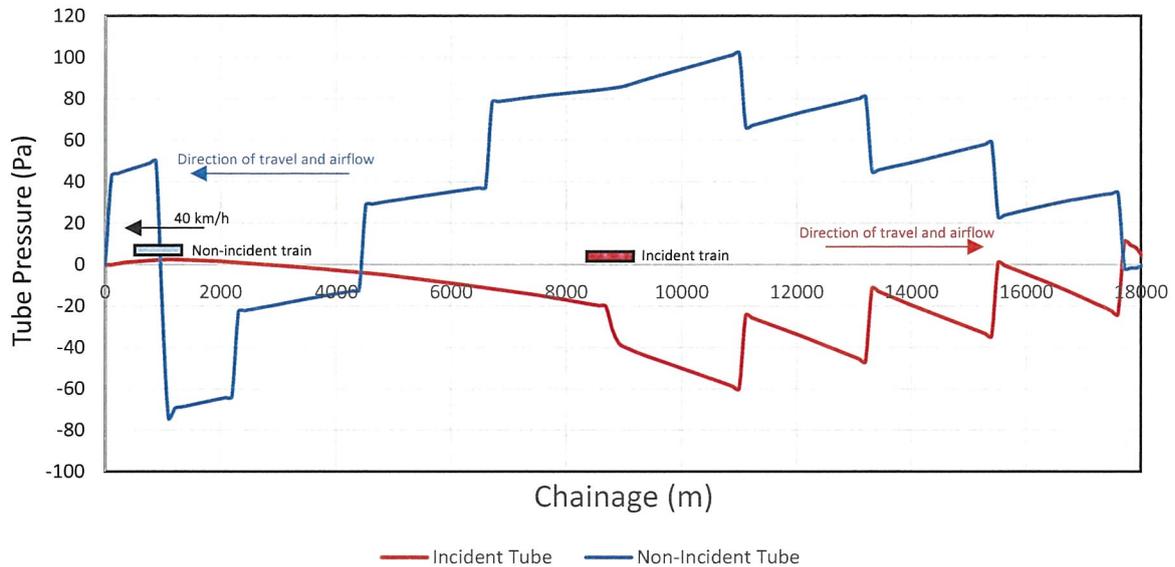


Abbildung 16 – Druckverlauf in der Unfallröhre (rot) und der unfallfreien Röhre (blau) während der Evakuierung. Der verunfallte Zug steht bei 8.700 m und die Querschläge sind geöffnet. Der nicht verunfallte Zug fährt mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h und hat fast den Tunnelausgang erreicht (Position bei 1.000 m).

Tube pressure	Druck in Röhre
Direction of travel and airflow	Fahrt-/Luftstromrichtung
Non-incident train	Unfallfreier Zug
Incident Train	Verunfallter Zug
Chainage	Verkettung
Non-incident Tube	Unfallfreie Röhre
Incident Tube	Unfallröhre

## 7. Fazit

### 7.1 Erfüllung der Sicherheits- und Rauchabführungsziele

Die Druckanalyse zeigt, dass Doppelluftschleusen-Querschläge nicht erforderlich sind, um bei einem Personenzugbrand mit einer Brandleistung von 20 MW eine Rauchausbreitung zur unfallfreien Röhre zu verhindern. Somit ist eine alternative technische Lösung zur Bereitstellung eines sicheren Bereiches belegt.

In dem ermittelten realistischen Worst-Case-Szenario (Szenario 1h) lassen sich unerwünschte Luftströme von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre durch den Betrieb der Lüftungsanlage mit Strahlventilatoren verhindern.

Ohne Lüftung und bei offenen Querschlägen entweicht der Unterdruck hinter dem unfallfreien Zug aus dem Tunnel, wobei Luft aus der Unfallröhre

gezogen wird, was eine Rauchausbreitung zur unfallfreien Röhre bedeutet. Mit einer geeigneten Lüftungsanlage lässt sich dieser unerwünschte kurzzeitige Luftstrom vermeiden. Mit der „Pull“-Strategie (Abbildung 5) entweder mit 3 Strahlventilatoren alle 2,2 km oder mit einer höheren Zahl an Ventilatoren an den Tunnelportalen lässt sich ein Luftstrom von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre sicherstellen. Die erforderliche minimale Luftstromgeschwindigkeit in den Querschlägen von 2 m/s kann schnell erzielt und aufrechterhalten werden.

Ebenso ist die Lüftungsstrategien in der Lage, die kritische Luftstromgeschwindigkeit hinter dem verunfallten Zug zu erreichen.

Es wird angemerkt, dass die Lüftungsanlage schnellstmöglich nach Halt des verunfallten Zuges aktiviert werden muss. Konkret heißt das, dass die Lüftungsanlage mit voller Leistung laufen muss, bevor die Türen der Querschläge geöffnet werden.

Eine „Pull“-Lüftungsstrategie wird empfohlen, bei der die Strahlventilatoren in der Unfallröhre hinter dem Brandherd in Betrieb sind, um den Druck in der Unfallröhre gegenüber der unfallfreien Röhre zu senken. Dies sorgt für einen Luftstrom von der unfallfreien Röhre zur Unfallröhre.

Um eine Rauchausbreitung in die unfallfreie Röhre durch Druckschwankungen zu verhindern, ist darauf zu achten, dass die unfallfreien Züge ihre Geschwindigkeit auf 40 km/h reduziert haben, bevor die Türen der Querschläge geöffnet werden. Andernfalls kann es für eine kurze Dauer von 10-20 Sekunden zu unerwünschten Luftströmen kommen. Jedoch werden etwaige Rauchschwaden schnell durch den hohen Luftstrom in der unfallfreien Tunnelröhre abgeführt.

Die überarbeitete Evakuierungsstudie (Anlage 2) [2] zeigt eine verlängerte Evakuierungszeit von 500 Sekunden im Worst-Case-Szenario, wenn sich das Passagieraufkommen aus 50 % Männern, 40 % Frauen und 10 % Personen mit eingeschränkter Mobilität zusammensetzt. Diese vorliegende Studie unterstreicht die Tatsache, dass die Lüftungsanlage die angrenzende Röhre dauerhaft zu einem sicheren Bereich macht, sobald Züge in der unfallfreien Röhre eine Geschwindigkeit von 40 km/h erreicht haben, wodurch die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. Konkret heißt dies, dass eine Zeitdauer von 150 Sekunden zwischen dem Anhalten des verunfallten Zuges und der Evakuierungsanweisung durch den Zugführer (Anhang 1 zum Hauptdokument) ausreicht, um sicherzustellen, dass der nicht verunfallte Zug seine Geschwindigkeit reduziert hat und die Lüftung in der Lage ist, die unfallfreie Tunnelröhre rauchfrei zu halten.

## **8. Auslegung der Tunnellüftungsanlage**

**8.1 Allgemeines**

Die im vorliegenden Dokument enthaltene Analyse bietet eine Orientierungshilfe für die Ausführungsplanung der Tunnellüftungsanlage. In den nachfolgenden Abschnitten 8.2 und 8.3 werden Schlußfolgerungen hinsichtlich der Anzahl und Position von Strahlventilatoren in den Bahntunnelröhren gezogen.

**8.2 Notfalllüftung**

Die Vorgehensweise bei einem Personenzugbrandszenario ist die Aktivierung der Strahlventilatoren unmittelbar nach der Auslösung des Feualarms. Die Standardrichtung der Lüftung in der Unfallröhre soll die Fahrtrichtung sein, um den restlichen Kolbeneffekt auszunutzen.

Sofern möglich wird empfohlen, zuerst die hinter dem Brandherd befindlichen Strahlventilatoren in Betrieb zu nehmen, um eine stratifizierte Rauchsicht zu erzeugen und die von einem schnellen Luftstrom vor dem Brandherd erzeugten Turbulenzen zu minimieren. Diese „Pull“-Strategie hat den zusätzlichen Vorteil, dass in der Unfallröhre am Brandort ein Unterdruck erzeugt wird, der eine Rauchausbreitung in die unfallfreie Röhre über die von den flüchtenden Fahrgästen geöffneten Türen der Querschläge verhindert. Weitere Strahlventilatoren können nacheinander zugeschaltet werden, wenn ein erforderlicher Luftstrom erzeugt werden muss.

Die Lüftung muss unmittelbar nach der Auslösung des Feualarms aktiviert werden, da die Herstellung der Luftstrom- und Druckregime in der Unfallröhre zwingend erforderlich ist.

Die obige Vorgehensweise kann vom Tunnelbetreiber unter Anleitung der Feuerwehr bei ihrer Ankunft außer Kraft gesetzt werden, wenn dies bei den Rettungsarbeiten und der Brandbekämpfung hilft.

Eine ausreichende Anzahl von Strahlventilatoren wird eingeschaltet, um eine kritische Mindestgeschwindigkeit des Luftstroms im Tunnel zu erzielen und dadurch einen Rauchrückschlag zu verhindern und eine für die Fahrgastevakuierung verträgliche Umgebung vor dem Brandherd zu erhalten.

Studien haben gezeigt, dass für die Planungsbrandlasten (Wärmeabgaberate) von 20, 50, 200 und 350 MW (entspricht einem Güterzugbrand) bei der größten Neigung in der Bahnöhre (1,25 %) eine kritische Mindestgeschwindigkeit von 2,6; 3,1; 3,6 bzw. 3,8 m/s im Zugtunnelringraum erzeugt werden muss, um einen Rauchrückschlag zu verhindern. Die Analyse geht von 90 % konvektiver Wärmeabgabe und 10 % Abstrahlungsverlust aus.

### 8.3 **Strahlventilatoren in Bahntunnelröhre**

Die entworfene Lüftungsanlage für die Bahntunnelröhren im Fehmarnbelttunnel umfasst insgesamt maximal 90 in Betrieb befindliche Strahlventilatoren, um die kritische Luftstromgeschwindigkeit im Ringraum in jeder Tunnelröhre bei einem größtmöglichen Brand (350 MW), was einem Güterzugbrand entspricht, zu erzielen.

Die prognostizierte Zahl der in Betrieb befindlichen Strahlventilatoren bei geringeren Planungsbrandlasten von 200, 50 und 20 MW beträgt 54, 25 bzw. 16 Ventilatoren. Dabei ist die Auswirkung ungünstiger Umwelteffekte wie beispielsweise ein widriger Winddruck am Tunnelportal, der einer Schubkraft von ungefähr 4 Strahlventilatoren entspricht, eingeschlossen.

Die in diesem Bericht enthaltene Schwankungsanalyse macht für eine erfolgreiche Lüftungsstrategie mindestens 24 Strahlventilatoren pro Tunnelröhre erforderlich. Die modellierte Strategie umfasste 24 Strahlventilatoren, die für eine Druckbeaufschlagung in der unfallfreien Tunnelröhre sorgen, und 12 Strahlventilatoren, die den Druck in der Unfallröhre reduzieren. Die Strahlventilatoren können entweder gleichmäßig über die gesamte Tunnellänge verteilt sein oder in der Nähe der Tunnelportale konzentriert werden. Die optimale Betriebsstrategie in jedem Brandszenario muss vom beauftragten Planer bestimmt werden.

Da der 350-MW-Brand mit 90 Ventilatoren die größte Zahl von in Betrieb befindlichen Strahlventilatoren pro Röhre erforderlich macht, ist dies der Design Case für die Planung der Ventilatoranzahl und -positionen. Es wurde nachgewiesen, dass bereits ein Teil dieser Ventilatoren ausreicht, um die Druckschwankungen bei einem 20-MW-Personenzugbrand zu minimieren.

Die tatsächliche Zahl der installierten Strahlventilatoren wird aber größer sein, wobei davon ausgegangen wird, dass einige Strahlventilatoren im Brandfall zerstört werden und das weitere Ventilatoren wartungsbedingt nicht in Betrieb sind (etwa 10 %). Die Anzahl der erforderlichen Strahlventilatoren ist nicht direkt proportional zur kritischen Geschwindigkeit, da ein weiterer wichtiger Faktor die gestiegene Lufttemperatur hinter dem Brandherd ist, die die Luftdichte reduziert und somit die effektive Schubkraft der Strahlventilatoren hinter dem Brandherd vermindert.

Daher ist es sehr wichtig, die richtige Verteilung der Strahlventilatoren entlang der Bahnrohre für verschiedene Brandunfallorte zu berücksichtigen. In der Planungsgrundlage für die Tunnellüftung ist enthalten, dass eine größere Zahl von Strahlventilatoren in den Portalbereichen installiert wird, damit durch den Betrieb von so vielen Strahlventilatoren wie möglich hinter einem Brandort der erforderliche Unterdruck in der Unfallröhre erzeugt werden kann.

Aufgrund von räumlichen Beschränkungen in den Bahnröhren gibt es einen Strahlventilator oberhalb des Notgehweges – mit drei nacheinander in einem Abstand von mindestens 70 m installierten Einheiten. Diese Anordnung kann alle 400 m wiederholt werden und sich zur Vereinfachung des Zugangs und der Wartung mit der Strahlventilatoranordnung in der angrenzenden Straßenröhre decken. Strahlventilatoren in der Straßenröhre können in Ventilatorgruppen – bestehend aus je drei Ventilatoren – alle 400 m installiert werden.

Es besteht ausreichend Platz für 135 Strahlventilatoren in jeder Bahntunnelröhre, was den erforderlichen Bedarf selbst im schwerwiegendsten Fall eines 350-MW-Zugbrandes weit übersteigt. Alternativ können Strahlventilatoren alle 110 m installiert werden, idealerweise mittig zwischen den Querschlägen. Ein Kompromiß kann die Installation von Strahlventilatoren alle 110 m sein, wobei alle 440 m die Installationsposition leer bleibt.

Die gewählten Strahlventilatoren sind umkehrbare Einheiten mit einem Innendurchmesser von 710 mm (maximaler Außendurchmesser 920 mm), die einen Luftstrahl von etwa 40 m/s mit einem Standschub von 750 N bei einer Motornennleistung von 30 kW erzeugen können. Die Ventilatorgehäuse sind 710 mm lang, wobei die Lüftereinheit zusammen mit den 2D-Schalldämpfern an beiden Enden für einen leiseren Betrieb insgesamt etwa 3,80 m lang ist.

In der in diesem Bericht enthaltenen Druckanalyse wird bei den Strahlventilatoren angenommen, dass sie eine Installationseffizienz von 0,7 haben, d. h., dass nur 70 % der Nennschubkraft von jedem Ventilator erzeugt wird. Die tatsächliche Installationseffizienz und deren Auswirkung auf die erforderliche Größe oder Anzahl der Strahlventilatoren ist vom Planer der Lüftungsanlage zu ermitteln.

Um eine Zerstörung von zu vielen Strahlventilatoren durch den Brand und Heißluft/Rauchschichten zu verhindern, müssen die Strahlventilatoren herstellerseitig für einen mindestens einstündigen Betrieb bei 250 °C ausgelegt sein. Dies ist eine marktgängige Standardspezifikation (sogar höhere Temperaturen und längere Zeiten sind weit verbreitet).

Es soll beachtet werden, dass die endgültigen Abmessungen, die Schubkraft und die Anzahl der Strahlventilatoren von den in dieser Entwurfsplanung verwendeten Angaben abweichen können und vom ausführenden Unternehmen und dem Hersteller/Lieferanten bestätigt werden.

## **9. Literaturverzeichnis**

[1] Langner V., Bopp R., Bailey P.R. (2010) *MINIMUM FLOW VELOCITY THROUGH OPEN CROSS PASSAGES IN TWIN BORE RAIL TUNNELS*, 5<sup>th</sup> International Conference 'Tunnel Safety and Ventilation' 2010, Graz.

[2] Rambøll, Arup, Tec (RAT); "Sicherheit im Eisenbahntunnel – Ergänzende Analyse zu den Fluchtzeitberechnungen; Anlage 2 zur TN Nr.: RAT 6729-321-3D"; TN Nr.: Attachment 2 to RAT 6729-321-D; 16.04.2015



## 10. Empfindlichkeitsstudien

### 10.1 Empfindlichkeitsstudie – Tunnelquerschnittsfläche

In dieser Projektphase können sich die Fläche und der Umfang des Tunnels ändern. Diesbezüglich haben wir eine Simulation durchgeführt, bei der die Fläche  $34,5\text{m}^2$  (vorheriger Wert:  $38,5\text{m}^2$ ) und der Umfang  $23,2\text{ m}$  betrug (vorheriger Wert:  $24,3\text{ m}$ ). Das modellierte Szenario war das Szenario 1d, bei dem die Querschläge geöffnet sind, bevor der unfallfreie Zug die Fahrt verlangsamt, was eine unrealistische Situation ist.

Die Analyse hat gezeigt, dass in diesem Fall der Einfluss der Fläche und des Umfangs auf den Luftstrom in den Querschlägen sehr gering ist. Wahrscheinlich werden sich diese Parameter gegenüber denen in diesem untersuchten Fall nicht mehr gravierend ändern, weswegen die aus dem Referenzfall gezogenen Schlußfolgerungen ihre Gültigkeit behalten.

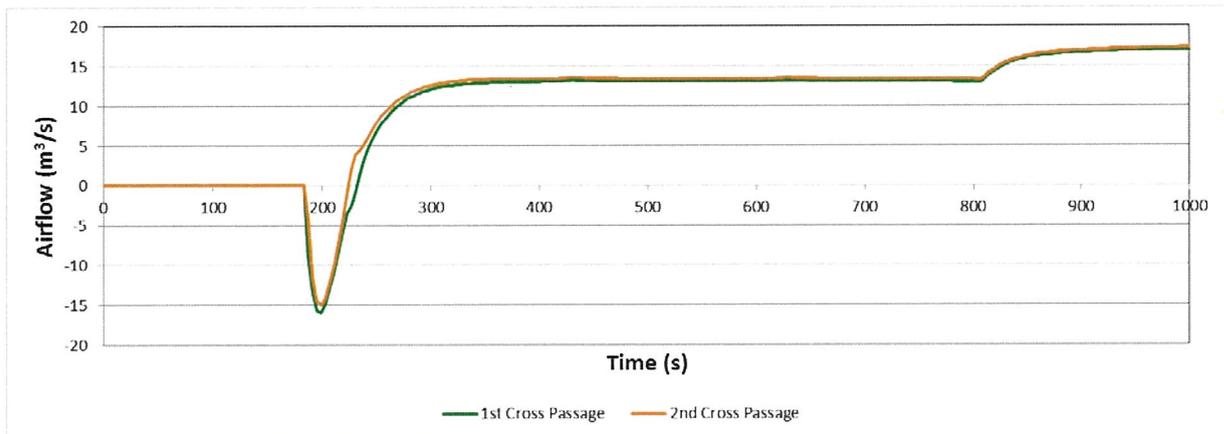


Abbildung 17: Luftstrom in den Querschlägen (A=34,5 m<sup>2</sup>, P=23,2 m)

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

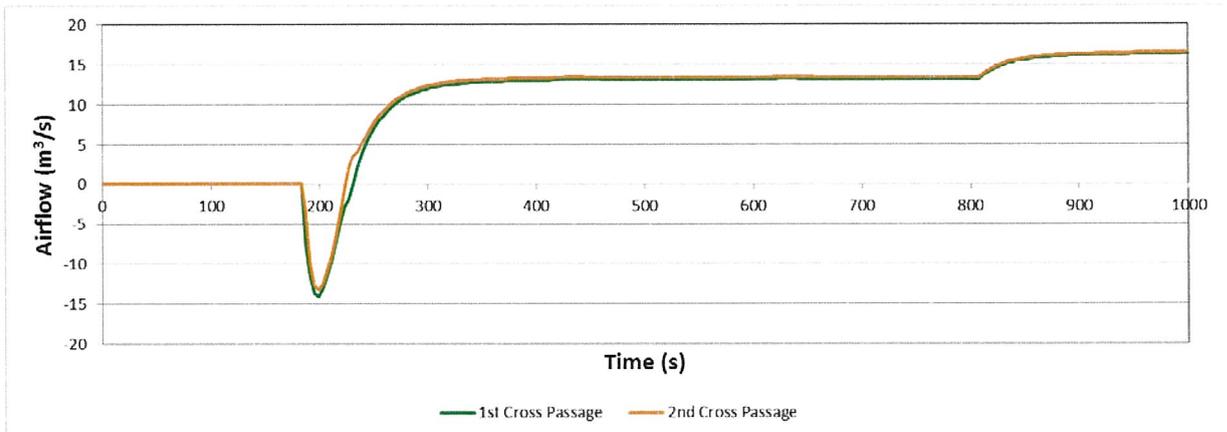


Abbildung 18: Luftstrom in den Querschlägen (A=38,5 m<sup>2</sup>, P=24,3 m)

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

**10.2 Empfindlichkeitsstudie – Aerodynamische Parameter**

Zur Durchführung der Simulationen der verschiedenen Notfallszenarien mussten die aerodynamischen Parameter des Zuges (Fahrzeugfront-Luftwiderstandsbeiwert  $C_D$  und Oberflächenreibungskoeffizient  $f_s$ ) sowie die Tunnelrauheit (R) basierend auf früheren Daten und typischen Werten angenommen werden. Da diese Beiwerte in dieser Studienphase noch nicht vollständig bestimmt sind, wurde eine Empfindlichkeitsstudie zur Untersuchung des Einflusses der einzelnen Beiwerte auf den resultierenden Luftstrom im Tunnel durch den Kolbeneffekt, den Spitzenluftstrom in den geöffneten Querschlägen und die Zeitdauer zur Umkehrung des Luftstroms in den Querschlägen durchgeführt.

Es ist zu beachten, dass die Empfindlichkeitsstudie unter Zugrundelegung des Szenarios 1d durchgeführt wurde, bei dem die Querschläge unrealistisch früh geöffnet werden, d. h. sobald der Zug stoppt, was für einen Luftstrom von der Unfallröhre zur unfallfreien Röhre sorgt. Die Empfindlichkeitsstudie erfolgte ohne Lüftungsbetrieb.

**Tabelle 3 – Einfluss der aerodynamischen Parameter auf die Luftströme im Tunnel und in den Querschlägen**

	reference			
<b>C<sub>D</sub></b>	0.3	0.3	0.3	1
<b>C<sub>f</sub></b>	0.023	0.023	0.05	0.023
<b>R (m)</b>	0.007	0.04	0.007	0.007
Resulting airflow in the tunnel due to the piston effect of the train	355 m <sup>3</sup> /s	304 m <sup>3</sup> /s	455 m <sup>3</sup> /s	370 m <sup>3</sup> /s
Peak in airflow when opening the cross passages	-14 m <sup>3</sup> /s	-15 m <sup>3</sup> /s	-21 m <sup>3</sup> /s	-15 m <sup>3</sup> /s
Time to reverse the flow in the cross passages	42 s	42 s	47 s	42 s

reference	Referenz
Resulting airflow in the tunnel due to the piston effect of the train	Luftstrom im Tunnel durch Kolbeneffekt des Zuges
Peak in airflow when opening the cross passages	Spitzenluftstrom bei Öffnung der Querschläge
Time to reverse the flow in the cross passages	Zeitdauer zur Umkehr des Luftstroms in den Querschlägen

W

ie in der Tabelle 3 aufgeführt, sahen die Referenzparameter für alle Simulationen wie folgt aus:

- $C_D = 0,3$
- $f_s = 0,023$
- $R = 0,007 \text{ m}$

Eine Änderung irgendeines Parameters wirkt sich auf die Luftströme im Tunnel aus. Eine deutliche Zunahme der Rauheit von 7 mm auf 40 mm

führt zu einem Abfall des Luftstroms von nur 14 %, wobei eine Zunahme des Reibungsfaktors oder des Luftwiderstandsbeiwertes einen Anstieg des Luftstroms verursacht. Es lässt sich schlußfolgern, dass der Reibungsfaktor der kritische Parameter ist, da eine Verdopplung des Wertes zu einem Anstieg der Strömungsmenge im Tunnel um 28 % führt, während eine Zunahme des Luftwiderstandsbeiwertes von 0,3 auf 1 lediglich einen Anstieg der Strömungsmenge um 4 % zur Folge hat.

Dies ist logisch, da bei einem relativ langen Zug (200 m) der nahezu die gesamte Zuglänge betreffende Reibungsfaktor einen größeren Einfluss als der Luftwiderstandsbeiwert hat, da dieser sich lediglich auf die Frontpartie des Zuges bezieht.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Zeitdauer zur Umkehrung des Luftstroms in den Querschlägen – als kritisches Ergebnis in der Notfallstudie erachtet – nicht gravierend durch die aerodynamischen Parameter variiert. Daher behalten die im Referenzfall gezogenen Schlußfolgerungen ihre Gültigkeit, sofern die Parameter nicht übermäßig geändert werden.

### 10.3 Empfindlichkeitsstudie – Unfallfreier Güterzug

In dem Fall, dass es sich bei dem in der unfallfreien Röhre fahrenden Zug um einen Güterzug handelt, ändern sich die Ergebnisse. Das untersuchte Szenario war das Szenario 1d, bei dem beide Züge zeitgleich den Unfallort erreichen und der unfallfreie Zug seine Fahrt 30 Sekunden nach dem Halt des verunfallten Zuges verlangsamt. Dieses Szenario ist zwar ein Worst-Case-Szenario aber kein „realistisches Worst-Case-Szenario“, da die Querschläge geöffnet werden, sobald der verunfallte Zug stoppt. Die Empfindlichkeitsstudie umfasst die ermittelte „Pull“-Lüftungsstrategie.

Die unterschiedliche Aerodynamik von Güterzug und Personenzug wurde durch Änderung von drei Parametern modelliert: Länge von 750 m (erhöht von 200 m), Oberflächenreibungskoeffizient von 0,03 (erhöht von 0,023) und Luftwiderstandsbeiwert der Fahrzeugfront von 1 (erhöht von 0,3).

Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, reduziert sich im Fall eines Güterzuges im unfallfreien Tunnel der Spitzenluftstrom in den Querschlägen deutlich (verglichen mit Abbildung 21 für einen Personenzug). Zudem werden unerwünschte Luftströme schnell umgekehrt. Der Grund hierfür ist die geringere Einfahrtgeschwindigkeit von 140 km/h des Güterzuges, wodurch sich der anfängliche Unterdruck in der unfallfreien Tunnelröhre reduziert und der Güterzug schneller auf 40 km/h abbremst.

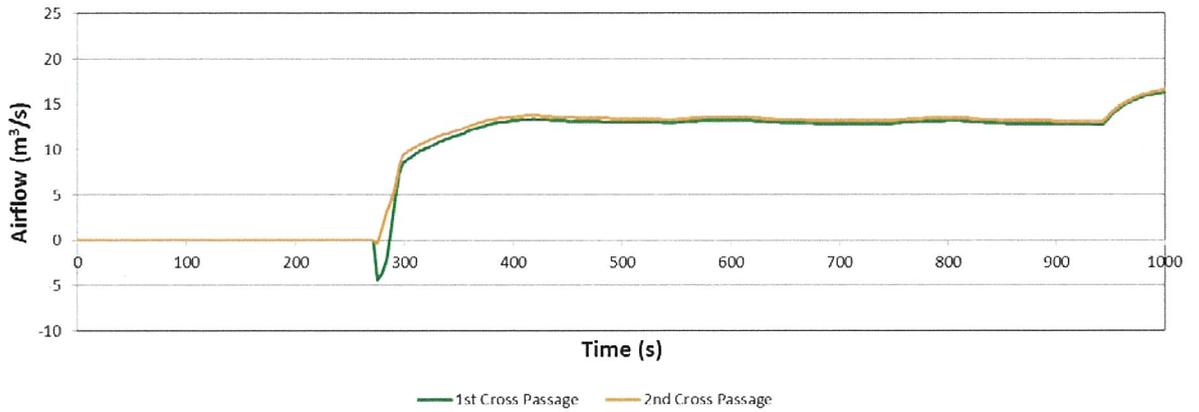


Abbildung 19: Luftstrom in den Querschlägen (Güterzug)

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit

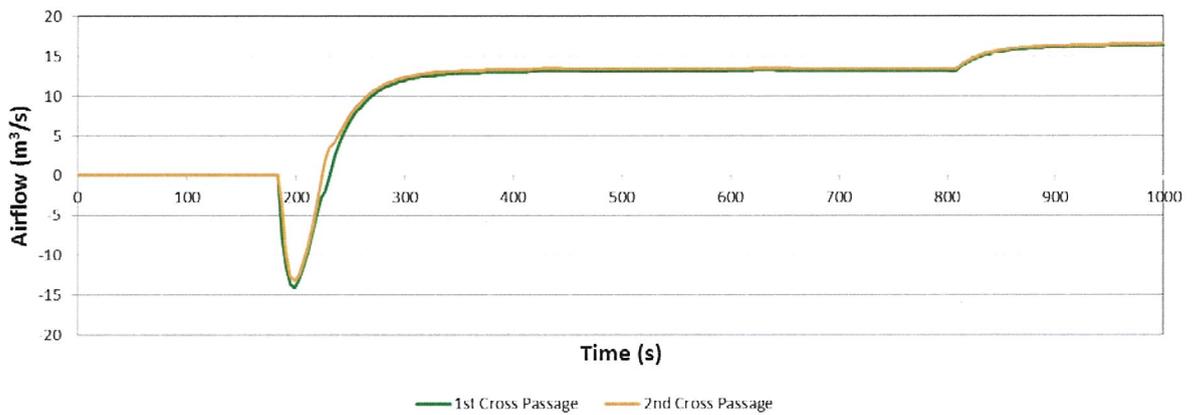


Abbildung 20: Luftstrom in den Querschlägen (Personenzug)

Airflow	Luftstrom
1st Cross Passage	1. Querschlag
2nd Cross Passage	2. Querschlag
Time	Zeit