BUNG

S. 1 - 37

Nachrichtlich

Fehmarnbelttunnel
Quantitative Risikoanalyse aufgrund Abweichungen zur RABT 2006 bzw. zum Entwurf 2016

Im Auftrag von
Fehmern A/S
German Plan Approval

Bericht
01. November 2017

Bearbeitung:

BUNG Ingenieure AG
Englerstraße 4
D-69126 Heidelberg

Tel.: +49 6221/306-0
Fax: +49 6221/306-172

Mail: info@bung-ag.de
www.bung-gruppe.de

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baltzer
Dipl.-Ing. Werner Riepe
M. Eng. Christiana Meyer
M. Eng. Torsten Brungsberg

in Zusammenarbeit mit:

PTV GROUP
the mind of movement

PTV Transport Consult GmbH Stuttgart
Kriegerstraße 15
D-70191 Stuttgart

Tel.: +49 711/16270-0
Fax: +49 711/16270-70

Mail: Stuttgart@consult.ptvgroup.com
www.ptvgroup.com

Verfasser:

Dr.-Ing. Georg Mayer
Dipl.-Ing. (FH) Sven Brennberger

Inhalt

1 Ausgangslage **5**

2 Aufgabenstellung und Abgrenzung **6**

3 Untersuchungsvarianten **6**

3.1 Untersuchungstunnel (Nullfall) 6

3.2 RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) 6

4 Untersuchungsgrundlagen **7**

4.1 Tunnelgeometrie 7

4.2 Bauliche Anlagen 8

4.3 Kommunikationseinrichtungen 8

4.4 Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung 9

4.5 Brandmeldeeinrichtungen 9

4.6 Brandbekämpfungseinrichtungen 9

4.7 Lüftung 10

4.7.1 Mechanische Längslüftung (Untersuchungstunnel) 10

4.7.2 Dimensionierung der Rauchabsaugung (RABT-Vergleichstunnel) 11

4.8 Verkehrstechnische Einrichtungen 12

4.9 Verkehrskenngrößen 12

4.10 Zusammenfassung der Tunnelparameter 13

5 Untersuchungsszenarien **16**

5.1 Betriebsart 16

5.2 Ereignisarten 16

5.3 Brandort 16

5.4 Brandleistung 16

5.5 Verkehrszustände 17

5.6 Alarmierung Tunnelnutzer und Tunnelsperrung gleichzeitig mit Detektion 17

5.7 Aktivierung des Lüftungssystems 18

5.8 Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage 18

5.9 Erhöhtes Schadensausmaß 18

5.10 Beginn der Fremdrettung 18

6 Risikoanalyse und Risikobewertung **19**

6.1 Grundsätzlicher Ablauf einer Risikoanalyse 19

6.2 Häufigkeitsermittlung 20

6.2.1 Definition von auslösenden Ereignissen 20

6.2.2 Entwicklung eines Ereignisablaufes 20

6.2.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis 22

6.2.4 Bestimmung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf 22

6.2.5 Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf 25

6.3 Berechnung der Schadensausmaße 25

6.3.1 Schadensausmaße infolge Kollision 25

6.3.2 Schadensausmaße infolge Brand 26

6.4 Ermittlung der Risiken 30

6.5 Risikobewertung 33

7 Zusammenfassung der quantitativen Risikoanalyse **34**

8 Fazit der Risikoanalysen (QRA und ORA) **35**

Literatur **36**

Abbildungen

Abbildung 1: Fehmarnbelttunnel im übergeordneten transeuropäischen Verkehrsnetz 5
Abbildung 2: Querschnitt des Fehmarnbelttunnels [PFU RQ 2016] 7
Abbildung 3: Regelquerschnitt RQ 31 T [RABT 2016] 7
Abbildung 4: Elemente einer stationären Brandbekämpfungsanlage für Tunnel (Quelle: SOLIT 1&2) 10
Abbildung 5: Empfehlung zur Anordnung von Strahlventilatoren in Deckennischen [LUFT 2017] 11
Abbildung 6: Brandverlaufskurven der CFD-Simulationen 17
Abbildung 7: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse und Risikobewertung 19
Abbildung 8: Beispiel für einen Ereignisbaum [QBRT 2006] 20
Abbildung 9: 3D-Modellierung des Fehmarnbelttunnels mit mech. Längslüftung und stationärer Brandbekämpfungsanlage 27
Abbildung 10: 3D-Modellierung des RABT-Vergleichstunnels mit mechanischen Längslüftung und Rauchabsaugung 27
Abbildung 11: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Untersuchungstunnel (Nullfall) (30 MW, Stau, 110 m NA-Abstand, aktivierte Brandlüftung (Längsventilation), ohne Brandbekämpfungsanlage) 29
Abbildung 12: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) (30 MW, Stau, 300 m NA-Abstand, aktivierte Brandlüftung (Rauchabsaugung)) 30
Abbildung 13: HA-Diagramm des Untersuchungstunnels (Nullfall) für die Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts 31
Abbildung 14: HA-Diagramm des RABT-Vergleichstunnels (Referenzfall) für die Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts 31
Abbildung 15: HA-Diagramm der Gesamtrisiken des Fehmarnbelttunnels sowie des RABT-Vergleichstunnels 32

Tabellen

Tabelle 1: Dimensionierung der Rauchabsaugung 12
Tabelle 2: Übersicht der Tunnelparameter des Untersuchungstunnels und des RABT-Vergleichstunnels 15
Tabelle 3: Typische Brandleistungen für verschiedene Kfz-Typen (Quelle: PIARC) 16
Tabelle 4: Untersuchungsszenarien 21
Tabelle 5: Häufigkeiten H_0 von Initialereignissen 22
Tabelle 6: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision 23
Tabelle 7: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes 25
Tabelle 8: Schadensausmaße infolge Kollision 26
Tabelle 9: Anzahl erforderlicher CFD-Simulationen 28
Tabelle 10: Schadenserwartungswerte für Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts (eine Tunnelröhre) 32
Tabelle 11: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Schadenserwartungswerte mit Referenzwert 33

1 Ausgangslage

Die Fehmarnbeltquerung (FBQ) zwischen Dänemark und Deutschland ist Bestandteil des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V) und verbindet Skandinavien mit Mitteleuropa entlang der so genannten „Vogelfluglinie" auf kürzester Strecke. Dadurch werden die Metropolregionen Hamburg/Lübeck und Kopenhagen/Malmö direkt miteinander verknüpft und eine durchgängige Nord-Süd-Achse von Skandinavien bis nach Süditalien geschaffen. Die Realisierung der Fehmarnbeltquerung erfolgt mittels eines ca. 18 km langen Absenktunnels zwischen der dänischen Insel Lolland und der deutschen Insel Fehmarn. Nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Lage des Fehmarnbelttunnels im transeuropäischen Verkehrsnetz.

Abbildung 1: Fehmarnbelttunnel im übergeordneten transeuropäischen Verkehrsnetz

Der Fehmarnbelttunnel wird als vierröhriger, kombinierter Eisenbahn- und Straßentunnel ausgebildet, so dass sowohl der Eisenbahntunnel als auch der Straßentunnel über je eine Röhre je Fahrtrichtung verfügen. Die Bahnstrecke ist elektrifiziert und weist ein Streckengleis je Röhre auf. Der Straßentunnel wird mit zwei Fahrstreifen je Röhre ausgebildet und soll im Richtungsverkehr betrieben werden.

Bei der geplanten Realisierung des Straßentunnels der Fehmarnbeltquerung treten Abweichungen zu den Vorgaben in den aktuell gültigen deutschen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunnel [RABT 2006] auf, insbesondere hinsichtlich der Anordnung von Notgehwegen, dem Lüftungssystem sowie der zulässigen Geschwindigkeit im Tunnel. Sicherheitserhöhend wirken sich die Notausgänge, Notrufstationen, manuellen Brandmeldeeinrichtungen sowie Hydranten aus, welche mit geringeren Abständen zueinander als nach den RABT gefordert geplant sind. Des Weiteren sind auch durch die Videoüberwachung mit automatischer Bildauswertung (AID) und das Vorhalten einer ortsfesten, automatischen Brandbekämpfungsanlage sicherheitserhöhende Wirkungen zu erwarten.

2 Aufgabenstellung und Abgrenzung

Für den Fehmarnbelttunnel ist mittels einer quantitativen Risikoanalyse (QRA) das zu erwartende Sicherheitsniveau des Straßentunnels aufgrund von Kollisionen und Brandereignissen zu ermitteln.

Zur Berechnung des Risikos (Schadenerwartungswert) infolge von Brand- und Rauchausbreitungsvorgängen, ist der geplante Fehmarnbelttunnel in seiner beabsichtigten Bauform mitsamt seinen sicherheitstechnischen Einrichtungen (Untersuchungstunnel) in einem 3-dimensionalen Rechenmodell abzubilden. Zu betrachten sind hierbei Brände mit Brandlasten von 5 MW, 30 MW und 100 MW.

Die Bewertung des errechneten Sicherheitsniveaus erfolgt durch einen Relativvergleich mit dem Sicherheitsniveau eines nach den Vorgaben der RABT ausgestatteten Tunnels (RABT-Vergleichstunnel) mit einer mechanischen Längslüftung und einer Rauchabsaugung über einzeln ansteuerbare Klappen. Hierzu sind Berechnungen erforderlich, die analog zu denen des geplanten Fehmarnbelttunnels (Untersuchungstunnel) ausgeführt werden.

Die vorliegende Untersuchung berücksichtigt dabei sowohl die aktuelle Fassung der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln [RABT 2006] als auch den im Zuge der Aktualisierung erstellten Entwurf [RABT 2016].

Die Ermittlung und Bewertung von Ereignissen mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgütern nach ADR[1] erfolgt nach dem gesonderten „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007" [FE ADR 2009] und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Diese Untersuchung muss spätestens für den Teil Straßentunnel bis zur Inbetriebnahme des Tunnels erfolgen.

3 Untersuchungsvarianten

Für die nachfolgenden Untersuchungsvarianten wird das individuelle Sicherheitsniveau mit Hilfe von Simulationsrechnungen zu Pkw- und Lkw-Brandereignissen bestimmt. Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer baulichen Ausprägung und der vorhandenen sicherheitstechnischen Ausstattungen. Verglichen werden dabei der Untersuchungstunnel (Nullfall) in seiner geplanten Form und der RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) mit einer Tunnelausstattung gemäß den Vorgaben der RABT.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden zu betrachtenden Untersuchungsvarianten werden in Kapitel 4 näher beschrieben.

3.1 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Der Untersuchungstunnel (Nullfall) ist der Fehmarnbelttunnel in seiner beabsichtigten Bauform und der geplanten sicherheitstechnischen Tunnelausstattung. Der Tunnel wird trotz seiner Länge von über 18 km mit einer reinen Längsventilation ausgerüstet. In den Rampenbereichen sind über kurze Strecken Längsneigungen von über ± 3 % zu verzeichnen. Die weitere Tunnelausstattung erfüllt die Vorgaben der RABT.

3.2 RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall)

Im Fall des RABT-Vergleichstunnels (Referenzfall) handelt es sich um einen richtliniengerecht ausgestatteten Richtungsverkehrstunnel, der mit einer mechanischen Längslüftung und einer Rauchabsaugung über einzeln ansteuerbare Klappen ausgerüstet ist. Als Regelquerschnitt wird ein RQ 31 T angesetzt. Der Notausgangsabstand beträgt 300 m und die maximale Längsneigung im Tunnel ± 3 %.

[1] Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route [ADR 2015]

4 Untersuchungsgrundlagen

4.1 Tunnelgeometrie

Der Tunnel der Fehmarnbeltquerung ist als ca. 18 km langer, mehrröhriger Tunnel geplant. Sowohl der Eisenbahntunnel als auch der Straßentunnel verfügen über je eine Röhre je Fahrtrichtung. Die Röhren sind als Rechteckquerschnitte ausgebildet.

Der Straßentunnel der Fehmarnbeltquerung soll ausschließlich im Richtungsverkehr betrieben werden. Er wird mit zwei 3,50 m breiten Fahrstreifen, einem 2,35 m breitem Seitenstreifen und mit 0,30 m bzw. 0,60 m breiten Randstreifen je Röhre ausgebildet. Beidseitig der Fahrbahn werden 0,30 m breite Betonwände als Anprallschutz angeordnet. Jede Röhre weist eine lichte Breite von 11,00 m und eine lichte Höhe von 5,20 m auf. Die Fahrbahnen sind zu den äußeren Fahrbahnrändern mit 2,0 % geneigt. Die Längsneigung beträgt in den Rampenbereichen über jeweils kurze Bereiche von ca. 50-75 m bis zu ± 3,50 %. Innerhalb der Tunnelstrecke liegt die maximale Längsneigung bei ± 1,25 %.

Nachfolgende Abbildung 2 zeigt den Querschnitt des gesamten Fehmarnbelttunnels einschließlich der Eisenbahnröhren.

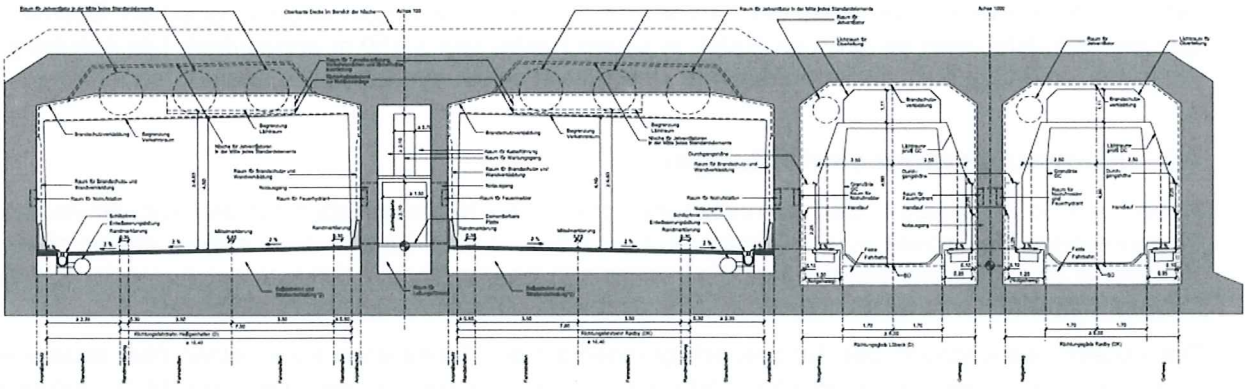

Abbildung 2: **Querschnitt des Fehmarnbelttunnels [PFU RQ 2016]**

Für den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) wird die Tunnellänge unverändert übernommen. Der für den Fehmarnbelttunnel vorgesehene Tunnelquerschnitt entspricht nicht den Vorgaben der RABT und wird für die Modellierung des Vergleichstunnels daher angepasst. Als Regelquerschnitt des Vergleichstunnels wird ein RQ 31 T gemäß den RABT angesetzt, der gegenüber dem geplanten Regelquerschnitt des Fehmarnbelttunnels eine lichte Breite von 12 m aufweist (siehe Abbildung 3).

In beiden Fällen weisen die Fahrstreifen jeweils eine Breite von 3,50 m auf. Der RABT-Regelquerschnitt hat einen Seitenstreifen von 2,0 m und zwei Randstreifen mit jeweils 0,5 m Breite. Zudem sind beidseits der Fahrbahn Notgehwege mit 1,0 m Breite angeordnet. Betongleitwände sind gemäß den Vorgaben der RABT nicht erforderlich und werden daher beim Referenzfall nicht berücksichtigt.

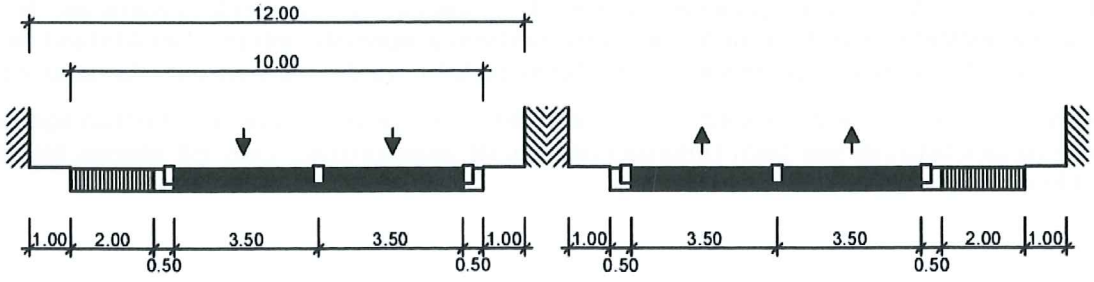

Abbildung 3: **Regelquerschnitt RQ 31 T [RABT 2016]**

In den Rampenbereichen treten beim Fehmarnbelttunnel Längsneigung von ± 3,5 % auf, die für den RABT-Vergleichstunnel auf ± 3,0 % reduziert werden. Die Tunnelinnenstrecke liegt mit maximal ± 1,25 % Längsneigung innerhalb der Vorgaben der RABT und wird daher in beiden Untersuchungsvarianten angesetzt.

4.2 Bauliche Anlagen

Zwischen den beiden Röhren des Straßentunnels ist eine Versorgungsröhre (Zentralgalerie) angeordnet, die zur Aufnahme von Kabel und Leitungen sowie als Rettungsweg dient. Vom Verkehrsraum aus kann die Versorgungsröhre über die im Abstand von ≤ 110 m angeordneten Notausgänge erreicht werden. Notgehwege, über die die Tunnelnutzer im Ereignisfall die Notausgänge außerhalb der Fahrbahn erreichen können, sind nicht vorhanden. Notrufstationen zur Anordnung von Notrufsprechstellen, Handfeuerlöschern und Druckknopfmeldern sind auf der Seite des Seitenstreifens im Abstand ≤ 110 m vorgesehen.

Zur Sammlung und Ableitung von Schlepp-, Regen- und Löschwasser sowie flüssiger Gefahrstoffe aus dem Verkehrsraum sind einseitig, jeweils am rechten Fahrbahnrand Schlitzrinnen vorhanden. Um den Einsatzkräften eine Querung der Fahrbahnen zu ermöglichen, ist die Errichtung einer Rettungsüberfahrt im Bereich des Südportals vorgesehen.

Für den Referenzfall werden gemäß den Vorgaben der RABT Notausgangsabstände von 300 m angesetzt. Zusätzlich werden beidseits der Fahrbahnen 1,00 m breite Notgehwege vorgesehen. Ebenso werden die Notrufstationen gemäß den RABT in einem Raster von ≤ 150 m angeordnet. Die Ableitung von Flüssigkeiten erfolgt auch im Referenztunnel über Schlitzrinnen am tiefer gelegenen Fahrbahnrand.

4.3 Kommunikationseinrichtungen

Neben den Sprechstellen in den Notrufstationen stehen zur Kommunikation mit den Tunnelnutzern eine Lautsprecheranlage sowie eine Funkanlage zum Empfang und Einsprechen in den Verkehrsfunk zur Verfügung. Des Weiteren werden über die Funkanlage Kanäle für BOS-Dienste bereitgestellt. Zum Empfang von Mobilfunk wird für Mobilfunkbetreiber ein eigenes Antennensystem bereitgestellt.

Die visuelle Überwachung des Tunnels erfolgt innerhalb der Tunnelstrecke zum einen über feststehende Kameras, über die eine automatische Störfallerkennung (Automatic Incident Detection (AID)) möglich ist, und zum anderen über Schwenk-, Neige- und Zoomkameras (Pan-Tilt-Zoom (PTZ)), die entweder ereignisorientiert oder auf Anforderung durch Operatoren Videobilder an die Leitzentrale übermitteln.

Das System zur automatischen Störfallerkennung ermöglicht die Detektion von liegengebliebenen und langsamen Fahrzeuge, von verlorenen Gegenständen, Fußgängern oder Tieren auf der Straße, Falschfahrern oder Verkehr in der falschen Richtung sowie die Erkennung von Rauch. Die feststehenden Kameras des AID-Systems werden so angeordnet, dass eine lückenlose Überwachung des Verkehrsraums gewährleistet ist. Dies ermöglicht äußerst kurze Detektionszeiten von ≤ 30 s. Die PTZ-Kameras werden im Bereich der Notausgänge bzw. der Notrufstationen angeordnet und werden beim Bedienen dieser Einrichtungen über (Tür-)Kontakte in der Leitzentrale aufgeschaltet. PTZ-Kameras sind außerdem zur Überwachung der Rampen außerhalb der Tunnelstrecke vorgesehen.

Gemäß den Vorgaben der RABT ist eine kameragestützte automatische Störfallerkennung nicht zwingend erforderlich und wird daher für den Vergleichstunnel auch nicht berücksichtigt. Der Entfall der automatischen Störfallerkennung führt zu längeren Detektionszeiten. Beim Referenzfall wird daher von einer Detektionszeit von ≤ 60 s ausgegangen. Die RABT fordern in Tunnel ebenfalls Kameras, die aber üblicherweise feststehend sind und nicht mit Zoomobjektiven ausgerüstet werden. Der Abstand der Kameras darf hierbei 75 m nicht überschreiten. An den Tunnelportalen werden schwenkbare Kameras installiert.

Die weiteren Kommunikationseinrichtungen wie die Lautsprecheranlage und Funkanlage werden im RABT-Vergleichstunnel wie beim Untersuchungstunnel angenommen. Dies gilt ebenso für den Betrieb von Mobilfunk im Tunnel.

4.4 Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung

Damit Tunnelnutzer im Ereignisfall möglichst schnell einen Überblick über ihre Fluchtmöglichkeiten erhalten, werden für den Fehmarnbelttunnel beidseits der Fahrbahn im Abstand ≤ 25 m hinterleuchtete Fluchtwegkennzeichen auf den Tunnelwänden angebracht. Darüber hinaus werden auf der Seite der Notausgänge im Abstand $\leq 12{,}5$ m Orientierungsbeleuchtungen installiert. Weitere Kennzeichnungen durch aktive Leitelemente sind nicht vorgesehen.

Für den RABT-Vergleichstunnel werden auf der Seite der Notausgänge Fluchtwegkennzeichen angebracht, deren Abstand gemäß den RABT 25 m nicht überschreiten darf. Die Orientierungsbeleuchtung wird vorzugsweise gemeinsam mit der Fluchtwegkennzeichnung als kombinierte Leuchte an der Tunnelwand in 1 m Höhe über dem Notgehweg angebracht. Außerdem dienen an den Fahrbahnrändern angebrachte aktive Leiteinrichtungen zur Unterstützung der Orientierung und Verdeutlichung des Fahrkorridors.

4.5 Brandmeldeeinrichtungen

Zur Erkennung von Bränden ist ein Brandmeldekabel an der Tunneldecke installiert. Des Weiteren kann über Druckknopfmelder sowie über die Sprechstellen in den Notrufstationen ein Brand gemeldet werden. Ferner wird über Kontakte das Entnehmen eines Feuerlöschers aus einer Notrufstation in der Leitstelle angezeigt und ein Brandalarm ausgelöst. Darüber hinaus ermöglicht die Überwachung des Verkehrsraums mittels der kameragestützten automatischen Störfallerkennung (AID) die Meldung eines Brandereignisses durch die Detektion von Rauch im Videobild. Um Informationen über aktuell im Tunnel befindliche Güter zu erhalten, erfolgt im Bereich der Portale zusätzlich eine automatische, videogestützte Gefahrguterkennung.

Der RABT-Vergleichstunnel berücksichtigt keine AID zur videobildgestützten Raucherkennung. Die Videoanlage wird nur zur visuellen Überwachung durch die Operatoren in der ständig besetzten Leitstelle genutzt. Die weiteren Brandmeldeeinrichtungen sind allerdings in vergleichbarer Weise vorhanden.

4.6 Brandbekämpfungseinrichtungen

In den Notrufstationen sind jeweils zwei Feuerlöscher zur Entnahme und Nutzung durch Tunnelnutzer im Ereignisfall vorhanden. Für die Versorgung der Feuerwehr mit Löschwasser steht sowohl am Nordportal als auch am Südportal über Behälter ein Löschwasservorrat von jeweils 144 m³ (72 m³ + 72 m³) bereit. Zur Entnahme von Löschwasser sind innerhalb der Tunnelröhren Hydranten im Abstand von ≤ 110 m angeordnet, deren Anbindung an die Löschwasserbehälter über eine stets mit Wasser gefüllte Löschwasserleitung erfolgt. Die Löschwasserleitung ist so dimensioniert, dass an den Hydranten eine Durchflussmenge von 1.200 l/min (20 l/s) bei einem Entnahmedruck von mindestens 6 bar über die Dauer von 60 min gewährleistet ist.

Zur Versorgung der stationären Brandbekämpfungsanlage mit einer Durchflussmenge von 2.600 l/min über einen Zeitraum von 60 min steht in den Löschwasserbehältern am Nord- und Südportal ein Löschwasservorrat von jeweils 156 m³ zur Verfügung. Die Konzeption der Anlage sieht eine Unterteilung in 18 bis 25 m lange Löschabschnitte[2] vor, die über Bereichsventile einzeln ansteuerbar sind. Im Fall eines Brandes werden stets 3 Löschabschnitte gleichzeitig aktiviert, so dass ein Bereich von bis zu ca. 75 m mit Wasser beaufschlagt wird. Die Düsen sind in einem Abstand von jeweils 3 m zueinander an der Tunneldecke installiert. In jedem Abschnitt kommen 16 Düsen zum Einsatz. Zwischen den Fahrstreifen sind die Düsen um 1,50 m zueinander versetzt. Der Abstand der Düsen in Querrichtung beträgt 3,50 m.

Nachfolgende Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Darstellung zum grundsätzlichen Aufbau einer stationären Brandbekämpfungsanlage.

[2] Im Zuge der Simulationsrechnungen wurde eine Abschnittslänge von 24 m angesetzt.

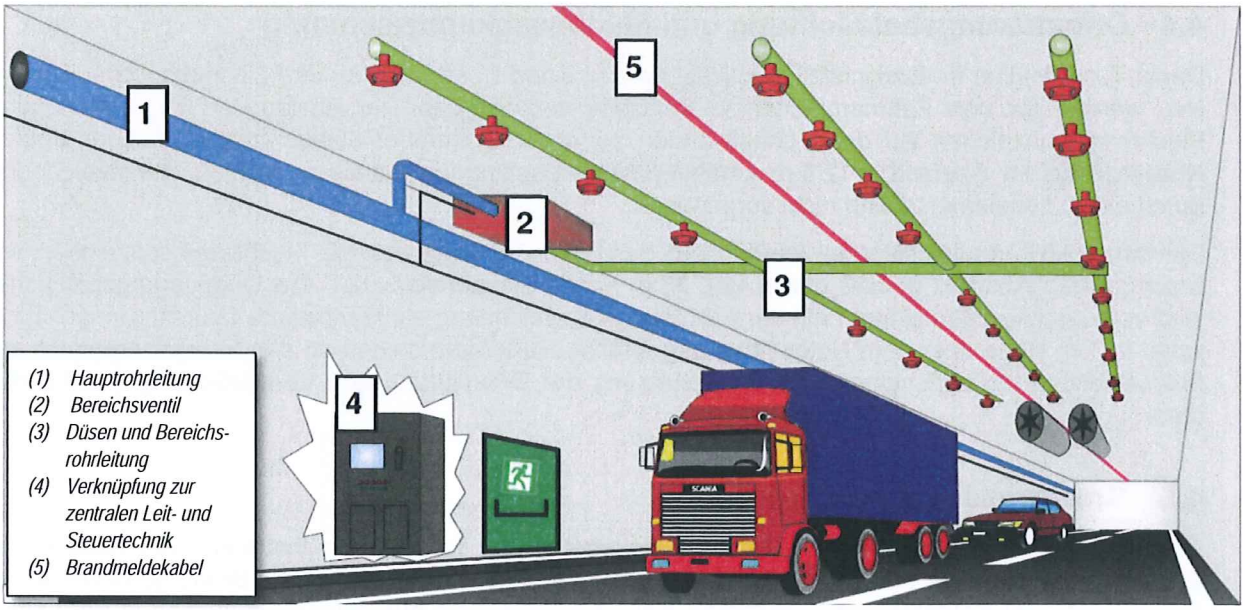

Abbildung 4: Elemente einer stationären Brandbekämpfungsanlage für Tunnel (Quelle: SOLIT 1&2)

Der RABT-Vergleichstunnel weist keine stationäre Brandbekämpfungsanlage auf. Zur Brandbekämpfung stehen im Ereignisfall daher nur die Feuerlöscher in den Notrufstationen sowie das über die Hydranten für die Feuerwehr bereitgestellte Löschwasser zur Verfügung.

4.7 Lüftung

4.7.1 Mechanische Längslüftung (Untersuchungstunnel)

Die Lüftungsanlage der beabsichtigten Lösung für den Fehmarnbelttunnel besteht ausschließlich aus einer mechanischen Längslüftung mit reversiblen Strahlventilatoren. Zusätzliche Einrichtungen zum Luftaustausch bzw. zur Rauchabsaugung sind nicht vorhanden. Gemäß Lüftungsgutachten [LUFT 2017] werden unter der Annahme einer Bemessungsbrandleistung von 200 MW und einer daraus resultierenden kritischen Längsströmungsgeschwindigkeit von 3,16 m/s insgesamt 45 Strahlventilatoren mit einem Standschub von 1.600 N, einer Motornennleistung von 50 kW und einem Laufraddurchmesser von 1.250 mm bzw. einem Außendurchmesser von 1.450 mm erforderlich. Der Dimensionierung liegt außerdem die Annahme zugrunde, dass die Strahlventilatoren pro Lüfterquerschnitt in Dreiergruppen angeordnet werden und zwei Ventilatorgruppen im Brandfall als Reserve dienen. Es wird empfohlen, die Strahlventilatoren in Deckennischen (Vouten) mit einer Neigung von 10° unterzubringen. Die Nischenlänge ohne Anrampung soll hierbei mindestens 10 m betragen. In Längsrichtung werden die Vouten gleichmäßig auf die Tunnellänge verteilt, so dass sich mittlere Abstände zwischen den Strahlventilatoren von etwa 1.153 m ergeben. Der seitliche Abstand zwischen zwei Strahlventilatoren soll mehr als 1.200 mm und der Abstand zwischen Gehäuse und Decke bzw. zwischen Gehäuse und Lichtraum soll mehr als 300 mm betragen. Der seitliche Abstand zwischen Gehäuse und Tunnelwand muss größer als 600 mm sein. Die Empfehlungen zur Anordnung der Strahlventilatoren in den Deckennischen kann schematisch der Abbildung 5 entnommen werden.

Im Brandfall wird bei freiem Verkehr die Lüftung so geregelt, dass sich eine Längsströmungsgeschwindigkeit $u_{krit} \geq 3{,}16$ m/s einstellt. Dadurch wird vermieden, dass sich Wärme und Rauch entgegen der Fahrtrichtung ausbreiten. Bei einem Brandereignis mit Stau erfolgt eine Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit auf einen Wert zwischen 1,0 und 1,5 m/s. Dadurch wird die Rauch- und Wärmeausbreitung verlangsamt und den Tunnelnutzern über einen längeren Zeitraum die Möglichkeit geboten, sich in sichere Bereiche zu flüchten. Zur Vermeidung von Lüftungskurzschlüssen an den Portalen wird im Brandfall die Längsströmungsrichtung in der Nachbarröhre umgekehrt.

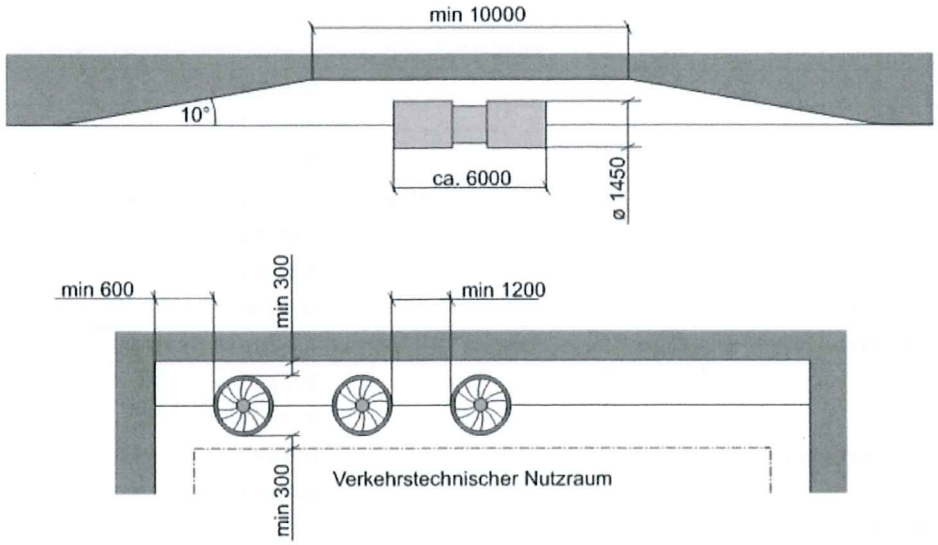

Abbildung 5: Empfehlung zur Anordnung von Strahlventilatoren in Deckennischen [LUFT 2017]

4.7.2 Dimensionierung der Rauchabsaugung (RABT-Vergleichstunnel)

Für den RABT-Vergleichstunnel ergeben sich hinsichtlich der Ventilation einige Änderungen. Unter Berücksichtigung der Verkehrsprognosewerte und der Tunnellänge ergibt sich eine Bemessungsbrandleistung von bis zu 100 MW, was auch den Maximalwert für die Dimensionierung einer Ventilation gemäß den RABT darstellt. Zugleich ist für Richtungsverkehrstunnel mit in der Regel frei abfließendem Verkehr bei Tunnellängen über 3.000 m eine Längslüftung mit Punktabsaugung bzw. Absaugung über steuerbare Abluftklappen und Abluftkanal als Lüftungsart im Brandfall zu wählen. Für den Vergleichstunnel wurde eine Absaugung über steuerbare Klappen gewählt, die nachfolgend dimensioniert wird.

Maßgeblich für die Bemessung der Rauchabsaugung gemäß [RABT 2016] ist der Maximalwert unter Berücksichtigung der nachfolgenden Kriterien:

I. $Q_{Absaug} \geq 1{,}5 \times Q_{Rauch}$

II. $Q_{Absaug} \geq (u_{krit} + 0{,}5\ m/s) \times A_{Tunnel}$

Ausgehend von einer Rauchgasmenge (Q_{Rauch}) von 200 m³/s sowie einer Längsströmungsgeschwindigkeit (u_{krit}) von 2,87 m/s (bei 100 MW) und einem Tunnelquerschnitt (A_{Tunnel}) von etwa 62 m² wird das Kriterium I maßgebend. Es ergibt sich somit eine Absaugmenge (Q_{Absaug}) von 300 m³/s, die über die Ventilation abgeführt werden muss.

Für jede Rauchklappe wird ein wirksamer Strömungsquerschnitt von 5 m² angenommen. Zur Begrenzung der maximalen Durchströmungsgeschwindigkeiten werden 4 Rauchklappen im Brandfall geöffnet, wobei jeweils 2 Klappen nebeneinander in Querrichtung zur Tunnellängsachse an der Tunneldecke installiert sind.

Nachfolgende Tabelle 1 beinhaltet die wesentlichen Berechnungsparameter und Rechenschnitte:

Grundparameter	**Straßentunnel (innenliegende Straßenverkehrsröhre)**
Länge Tunnel	18.452 m
DTV je Tunnelröhre (2030)	6.079 Kfz/24 h
Lkw-Anteil	15,11 %
Lkw-Fahrleistung	16.949 Lkw * km/Tag und Röhre
Bemessungsbrandleistung	100 MW
u_{krit} (100 MW)	2,87 m/s
Querschnittsfläche Tunnelfahrraum	ca. 62 m²
Bemessung Absaugung über steuerbare Klappen und Absaugkanal	
Q_{Rauch}	200 m³/s
Kriterium I: $Q_{Absaug} \geq 1{,}5 \times Q_{Rauch}$	300 m³/s
Kriterium II: $Q_{Absaug} \geq (u_{krit} + 0{,}5\ m/s) \times A_{Tunnel}$	209 m³/s
Maßgebliches Absaugvolumen	300 m³/s
Wirksamer Strömungsquerschnitt (3-5 m²)	5 m²
Gewählte zulässige Durchströmgeschwindigkeit (≤ 20 m/s)	15 m/s
Gewählte Anzahl geöffneter Klappen	4

Tabelle 1: Dimensionierung der Rauchabsaugung

4.8 Verkehrstechnische Einrichtungen

Der Fehmarnbelttunnel verfügt über zahlreiche verkehrstechnische Einrichtungen zur Erfassung und Steuerung des Verkehrs. Bereits 5 km vor den Tunnelportalen beginnt das System aus Verkehrsüberwachungskameras, Verkehrsdatenerfassungseinrichtungen und Wechselverkehrszeichen (WVZ). Um das Einfahren von überhohen Fahrzeugen in den Tunnel zu unterbinden, sind Höhenkontrollanlagen in den Zufahrten zu den Portalen angeordnet. Durch Hinweistafeln werden überhohe Fahrzeuge vor der letzten Ausfahrt angehalten und anschließend über Umleitungsstrecken abgeleitet. Eine zweite Kontrolle findet vor den Einfahrtsportalen statt, um Fahrzeuge zu stoppen, die der Umleitung nicht gefolgt sind. Unmittelbar vor den Portalen sind Sperrschranken angeordnet, um im Ereignisfall (Brand, Unfall) oder bei Sperrungen für Wartungszwecke das Einfahren von Fahrzeugen zu verhindern.

Innerhalb der Tunnelstrecke sind im regelmäßigen Abstand von ca. 400 m WVZ zur Geschwindigkeitsanzeige und Gefahrenwarnung (Panne, Unfall etc.) sowie zur Fahrstreifensignalisierung (Fahrstreifensperrung) installiert. Des Weiteren lassen sich über die WVZ Mitteilungen an die Tunnelnutzer schalten. Damit kann im Regelbetrieb präventiv und im Ereignisfall reaktiv frühzeitig auf kritische Situationen reagiert werden. Dadurch lassen sich beispielsweise Stauereignisse sowohl zeitlich als auch in ihrer räumlichen Ausdehnung begrenzen. Stausituationen mit mehr als 800 m Länge sind dadurch äußerst unwahrscheinlich. Sämtliche Schaltungen werden durch die Verkehrsleitzentrale (LCC) überwacht und gesteuert.

Die beschriebenen verkehrstechnischen Einrichtungen werden sowohl im Untersuchungstunnel (Nullfall) als auch im RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) angesetzt.

4.9 Verkehrskenngrößen

Für das Jahr 2030 wird für die Fehmarnbeltquerung eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) von 12.158 Kfz/d mit einem SV-Anteil von 15,11 %[3] prognostiziert. Daraus resultiert eine Verteilung des Verkehrs von 10.321 Pkw/d, 1.737 Lkw/d sowie 100 Busse/d.

Die maßgebende stündliche Verkehrsstärke entspricht 15,9 % der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke. Dies entspricht insgesamt rund 1.933 Fahrzeugen pro Stunde in beide Fahrtrichtungen.

Die durchschnittliche Fahrzeugbelegung wird mit 2,4 Personen pro Kfz angenommen. Personenkraftwagen zur gewerblichen Nutzung weisen 1,2 Personen/Pkw und Personenkraftwagen zur privaten Nutzung

[3] davon Lkw 14,29 % und Busse 0,82 %

2,9 Personen/Pkw auf. Lastkraftwagen sind i. d. R. mit 1,0 Personen/Lkw besetzt. Busse weisen durchschnittlich 35 Personen/Fahrzeug auf.

Zur direkten Vergleichbarkeit werden diese Werte sowohl für den Untersuchungstunnel (Nullfall) als auch den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) angesetzt.

4.10 Zusammenfassung der Tunnelparameter

In nachfolgender Tabelle 2 sind die wesentlichen Kenngrößen des Fehmarnbelttunnels (Untersuchungstunnel) sowie des RABT-Vergleichstunnels zusammengestellt.

Parameter		**Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel)**	**RABT-Vergleichstunnel**
Betriebsart		Richtungsverkehr (RV)	
Bauweise		Absenktunnel	
Tunnelgeometrie			
Tunnellänge		18,452 km (davon 17,6 km als Absenktunnel)	
Längsneigung		± 1,25 %, im Rampenbereich ± 3,50 %	± 1,25 %, im Rampenbereich ± 3,00 %
Tunnelquerschnitt	Typ	Sonderquerschnitt (Rechteck)	RQ 31 T (Rechteck)
	Anzahl Tunnelröhren	2	
	Lichte Breite je Röhre	11,00 m	12,00 m
	Lichte Höhe je Röhre	5,20 m	
	Höhe Lichtraum	4,50 m	
	Fahrstreifen je Röhre	2 x 3,50 m	
	Seitenstreifen je Röhre	1 x 2,35 m	1 x 2,00 m
	Randstreifen je Röhre	in Fahrtrichtung rechts: 0,30 m in Fahrtrichtung links: 0,60 m	in Fahrtrichtung rechts: 0,50 m in Fahrtrichtung links: 0,50 m
	Anprallschutz je Röhre	2 x 0,30 m	Nicht vorhanden
	Querneigung	2,0 % zum rechten Fahrbahnrand	
Bauliche Anlagen			
Notgehwege	Anordnung	nicht vorhanden	2 x 1,00 m
Notausgänge	Abstand	≤ 110 m	≤ 300 m
	Anordnung	in Mittelwand zur Versorgungsröhre / Rettungsstollen (linker Fahrbahnrand)	
Notrufstationen	Abstand	≤ 110 m	≤ 150 m
	Anordnung	einseitig, auf Seite des Seitenstreifens	
Entwässerung	System	Schlitzrinne	
	Anordnung	äußerer Fahrbahnrand	
Rettungsüberfahrten	Anordnung	im Bereich des Südportals	
Kommunikationseinrichtungen			
Notrufsprechstellen	Abstand	≤ 110 m	≤ 150 m
	Anordnung	in Notrufstationen	
Videoüberwachung	Art	Automatic Incident Detection (AID)	keine AID
	Anordnung	Tunnelstrecke	-
	Abstand	k. A.	-
	Funktionen	Erkennung von: - Liegengebliebene und langsame Fahrzeuge - Gegenstände, die Fahrzeuge verloren haben - Fußgänger oder Tiere auf der Straße - Rauch - Falschfahrer oder Verkehr in der falschen Richtung	-

Parameter		**Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel)**	**RABT-Vergleichstunnel**
Videoüberwachung	Art	Pan-Tilt-Zoom (PTZ)	Feststehende Kameras im Tunnel, Schwenk-Neige-Kameras im Portalbereich
	Anordnung	Tunnelstrecke und angrenzende Straßen und Rampen	Tunnelstrecke und Portalbereiche
	Abstand	≤ 110 m	≤ 75 m
	Funktionen	- Steuerung vom Bediener aus - Ereignisorientierte Aufschaltung (z.B. Öffnen einer Notausgangstür etc.)	
Tunnelfunk (BOS-Funk)	Art	TETRA-Standard (TErrestrial Trunked RAdio)	
Lautsprecheranlage	Art	PA-System	Grenzflächenhörner
	Funktionen	- Übertragung von aufgezeichneten Sprachnachrichten - Einsprechen über Bedienplatz in Verkehrsleitzentrale	
Verkehrsfunk	Einsprechmöglichkeiten	Einsprechen in laufendes Programm der analogen (FM) und der digitalen (DAB und DAB+) Übertragungen ist möglich	
Mobilfunk	Versorgung	gemeinsames Antennensystem für Mobilfunkbetreiber	
Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung			
Fluchtwegkennzeichnung	Abstand	alle 25 m	
	Anordnung	beidseitig	einseitig
Orientierungsbeleuchtung	Abstand	alle 12,5 m	alle 25 m
	Anordnung	einseitig, auf Seite der Notausgänge	
Aktive Leiteinrichtungen	Anordnung	nicht vorhanden	linker und rechter Fahrbahnrand
Brandmeldeeinrichtungen			
manuelle Brandmeldeeinrichtungen	Typ	Druckknopfmelder	
	Abstand	≤ 110 m	≤ 150 m
	Anordnung	in Notrufstation	
automatische Brandmeldeeinrichtungen	Typ	Linienbrandmelder	
	Anzahl	1 je Röhre	
	Anordnung	Tunneldecke	
Brandbekämpfungseinrichtungen			
Handfeuerlöscher	Art	Trocken-Feuerlöscher	
	Anordnung	in Notrufstation	
	Anzahl	2 je Notrufstation	
Löschwasserversorgung	Art	Hydranten	
	Abstand	≤ 110 m	≤ 150 m
	Anordnung	einseitig, auf Seite des Seitenstreifens	
	Löschwasservorrat	144 m³ (72 m³ + 72 m³)	102 m³
	Entnahmeleistung	2.400 l/min (1.200 l/min + 1.200 l/min)	1.200 l/min
Brandbekämpfungsanlage	Typ	Sprühwasserlöschanlage	nicht vorhanden
	Anordnung	Tunneldecke	-
	Löschwasservorrat	156 m³ (78 m³ + 78 m³)	-
	Sprühleistung	2.400 l/min	-

Parameter		**Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel)**		**RABT-Vergleichstunnel**
Lüftung				
Lüftung	System	mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren ohne zusätzl. Einrichtungen zum Luftaustausch bzw. Rauchabsaugung		mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren und Absaugung über Absaugklappen und Abluftkanal
	Bemessungsbrand-leistung	200 MW		100 MW
	u_{krit}	3,16 m/s		2,87 m/s
	Anzahl Strahlventilatoren	45 Stück je Röhre		33 Stück je Röhre
	Leistung eines Strahlven-tilators	50 kW		
	Standschub eines Venti-lators	1.600 N		
	Abmessungen	Länge	Laufrad - ϕ	Außen -ϕ
		ca. 6,0 m	1.250 mm	1.450 mm
Verkehrstechnische Einrichtungen				
Höhenkontrolle	Anordnung	- vor letzter Ausfahrt in den Zufahrtsstrecken - vor jedem Portal		
Tunnelsperranlage	Anordnung	vor jedem Portal		
WVZ	Anordnung	- Vorportalbereiche - Tunnelstrecke		
	Abstand	400 m		
Verkehrsdaten		**Prognose für das Jahr 2030**		
Verkehrs-aufkommen	Durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke (DTV) [Kfz/d]	12.158 *(insgesamt für beide Fahrtrichtungen)*		
	Pkw/d gewerblich (30 %) privat (70 %)	10.321 3.096 7.225		
	Lkw/d	1.737		
	Busse/d	100		
	Maßgebliche stündliche Verkehrsstärke (MSV) [Kfz/h]	1.933 *(insgesamt für beide Fahrtrichtungen)*		
	Pkw/d gewerblich (30 %) privat (70 %)	1.641 492 1.149		
	Lkw/h	276		
	Busse/h	16		
Verkehrs-anteile	SV- Anteil Lkw – Anteil Gefahrgutanteil am SV Bus – Anteil	15,11 % 14,29 % k. A. 0,82 %		
Fahrzeug-belegung	Personen / Kfz	2,4		
	Personen / Pkw gewerblich	1,2		
	Personen / Pkw privat	2,9		
	Personen / Lkw	1,0		
	Personen / Bus	35,0		
Zulässige Geschwindigkeit v_{zul}		110 km/h		

Tabelle 2: Übersicht der Tunnelparameter des Untersuchungstunnels und des RABT-Vergleichstunnels

5 Untersuchungsszenarien

5.1 Betriebsart

Die Tunnelröhren werden ausschließlich im Richtungsverkehr betrieben. Eine Betrachtung eines Gegenverkehrsbetriebs erfolgt daher nicht.

5.2 Ereignisarten

Entsprechend den Festlegungen für quantitative Risikoanalysen zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln gemäß [SB FE 2009], sind folgende auslösende Ereignisse (Initialereignisse) in die Untersuchungen einzubeziehen:

- Unfall
- Brand infolge Unfalls
- Brand infolge technischen Defekts

5.3 Brandort

Das zu erwartende Schadensausmaß kann durch die Lage des Brandortes beeinflusst werden. Als Lage des Brandes wird im Rahmen der Untersuchung der Szenarien die Tunnelmitte festgelegt. Der Brandort befindet sich unmittelbar vor einem Notausgang, so dass dieser nicht als Übergang in einen sicheren Bereich zur Verfügung steht.

5.4 Brandleistung

Als Brandleistung wird die maximale Energiefreisetzungsrate, welche über eine signifikante Zeitdauer auftritt, bezeichnet. Die Energiefreisetzungsrate bestimmt die Rauchgastemperatur und ist die treibende Kraft hinter der Rauchausbreitung. Im Rahmen der Untersuchung werden Brandleistungen von 5 MW, 30 MW und 100 MW betrachtet. Eine Brandleistung von 5 MW repräsentiert hierbei einen Pkw-Brand. Einem Bus- oder Lkw-Brand (eines unbeladenen Fahrzeugs) wird eine Brandleistung von 30 MW zugrunde gelegt. Da im Fall eines Lkw-Brandes mit brennbarer Ladung auch deutlich höhere Energiefreisetzungsraten erreichbar sind, wird darüber hinaus im Rahmen von Risikoanalysen eine Brandleistung von 100 MW berücksichtigt. Eine Zusammenstellung von typischerweise während eines Fahrzeugbrandes auftretenden Brandleistungen enthält nachfolgende Tabelle 3 .

Kfz	Brandleistung [MW]
Pkw	3-5
Van	5-10
Transporter	15
Bus / Lkw unbeladen	20-30
Lkw 25 t, beladen	30-50*
Lkw 50 t, beladen	70-150*
Tanklastwagen	200-300
** Abhängig von Menge und Art der Ladung*	

Tabelle 3: Typische Brandleistungen für verschiedene Kfz-Typen (Quelle: PIARC)

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein 5, 30 oder 100 MW Brand entsteht, wird aus den Verkehrsanteilen abgeleitet. Hierzu wird die Annahme getroffen, dass 6 % der Brandereignisse mit Beteiligung von Schwerverkehr zu einem 100 MW-Brand, die restlichen 94 % zu einem Brand mit 30 MW führen.

In Abhängigkeit der Brandursache ergeben sich zudem unterschiedliche Zeitpunkte bis die maximale Brandleistung erreicht wird. Brände infolge von Unfällen sind durch einen schnellen Brandverlauf gekennzeichnet, bei dem innerhalb von maximal 2 Minuten ein gleichförmiger Zustand erreicht ist. Dabei wird ein Anstieg der Brandleistung von 10 MW in 12 s berücksichtigt.

Den Bränden aufgrund von technischen Defekten geht eine Phase von 5 min voraus, in denen zunächst eine geringe Energiefreisetzung von 5 MW herrscht, bevor auch hier die Brandleistung auf ihre maximalen Werte ansteigt.

Für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) als auch für den RABT-Vergleichstunnel werden die gleichen Brandverlaufskurven verwendet. Nachfolgende Abbildung 6 stellt die Brandverlaufskurven anhand von Auswertungen der jeweiligen Simulationen dar. Zur besseren Darstellung sind die Kurven teilweise gestrichelt dargestellt.

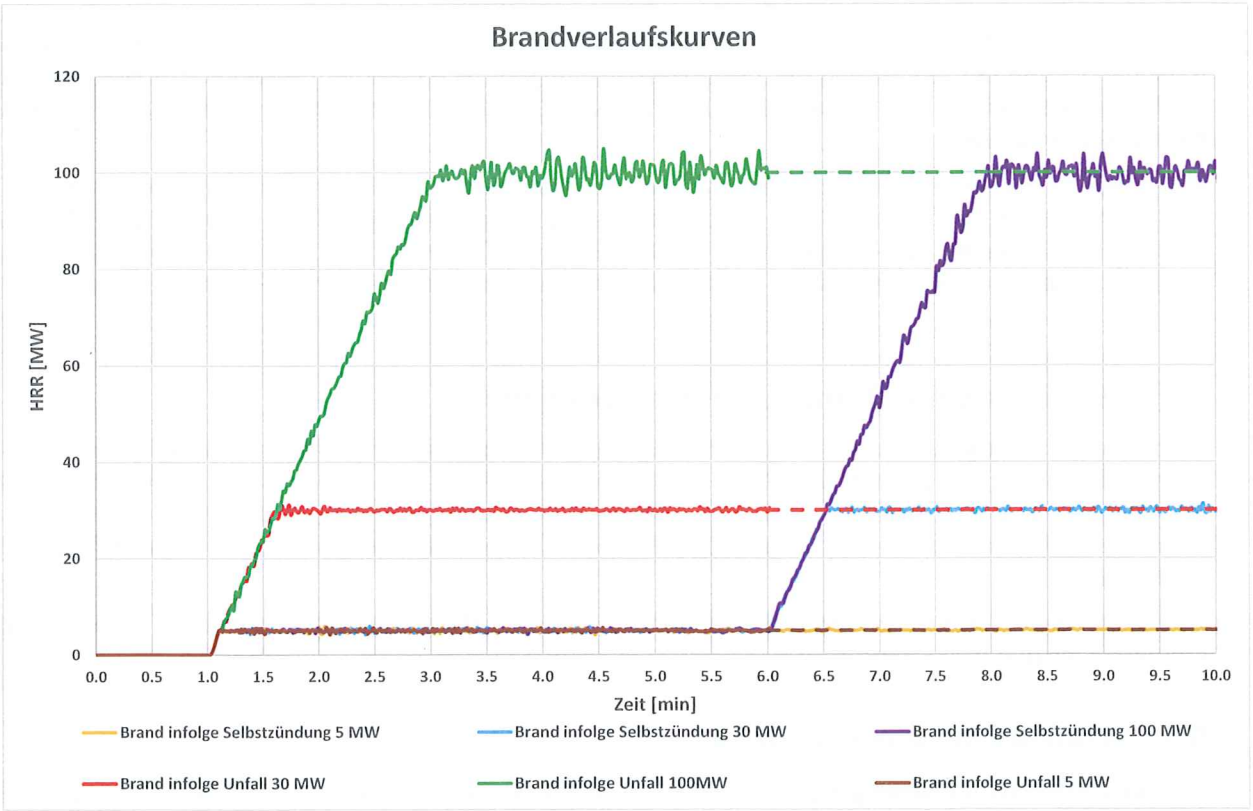

Abbildung 6: Brandverlaufskurven der CFD-Simulationen

5.5 Verkehrszustände

Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Brandereignisses. Es wird daher zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau unterschieden. Im Fall eines Brandereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge sich vor dem Brandherd aufstauen, während die auf der stromabwärtigen Seite befindlichen Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können.

Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Staus infolge von Überlastung bzw. Störungen in einem Streckenabschnitt. Hierbei können Tunnelnutzer beidseitig des Brandherdes der Gefahr von Rauch und Temperatur ausgesetzt sein.

Hinsichtlich der Verkehrszustände treten keine Unterschiede zwischen dem Untersuchungstunnel (Nullfall) und dem RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) auf.

5.6 Alarmierung Tunnelnutzer und Tunnelsperrung gleichzeitig mit Detektion

Die Alarmierung der Tunnelnutzer im Brandfall sowie das Aktivieren der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen (Tunnelsperrung) haben signifikante Auswirkungen auf das jeweilige Schadensausmaß.

Beim Fehmarnbelttunnel steht zur automatischen Brandmeldung neben dem Linienbrandmelder zusätzlich das installierte AID-System zur Verfügung. Für den Untersuchungstunnel (Nullfall) wird daher eine

Unterscheidung nach einer erfolgreichen Detektion eines 5 MW-Brandes innerhalb von 30 s bzw. keiner Detektion unterschieden.

Beim RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) kann eine automatische Detektion gemäß den Vorgaben der RABT nur mittels Brandmeldekabel (Temperaturerfassung an der Tunneldecke) erfolgen. Es wird daher Unterschieden zwischen der Detektion eines Brandereignisses mit Brandleistungen von mindestens 5 MW innerhalb von 60 s bzw. keiner Detektion.

5.7 Aktivierung des Lüftungssystems

Die Rauchausbreitung und somit das Schadensausmaß infolge von Rauch- und Temperatureinwirkung ist abhängig von der Aktivierung der Lüftungseinrichtungen nach erfolgter Detektion des Brandes. Somit ist der Erfolgsgrad der Aktivierung des Lüftungssystems, unter Voraussetzung einer erfolgten Detektion, mit zu berücksichtigen.

Im Vergleich zur reinen Längsventilation beim Fehmarnbelttunnel (Nullfall) wird im Zuge des RABT-Vergleichstunnels (Referenzfall) von einer Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal ausgegangen. Gemäß den Vorgaben der RABT muss das Öffnen der Klappen unmittelbar nach Detektion erfolgen und die Axialventilatoren müssen ihre volle Leistung innerhalb von 90 s nach Detektion erzielen.

5.8 Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

Mittels der im Fehmarnbelttunnel vorgesehenen automatischen Brandbekämpfungsanlage lässt sich nach deren Aktivierung die Brandausbreitung eindämmen und somit die Einwirkungen infolge Temperatur, Rauchgasen und Rauchpartikel verringern. Daher hat das erfolgreiche Aktivieren einer solchen Anlage einen maßgeblichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß und ist im Ereignisablauf mit einzubeziehen.

Der RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) weist gemäß den Mindestvorgaben der RABT keine Brandbekämpfungsanlage auf.

5.9 Erhöhtes Schadensausmaß

Bei der unmittelbaren Beteiligung von Bussen ist aufgrund der hohen Personendichte im Ereignisfall ein erhöhtes Schadensausmaß zu erwarten. Dies ist daher bei der Schadensausmaßermittlung gleichfalls mit zu berücksichtigen.

Dadurch, dass für den Nullfall und den Referenzfall dieselben Besetzungsgrade angesetzt werden, sind keine Unterschiede in Hinblick auf erhöhtes Schadensausmaß zu erwarten.

5.10 Beginn der Fremdrettung

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Zur Berücksichtigung der Fremdrettung wird sowohl für den Fehmarnbelttunnel als auch den RABT-Vergleichstunnel eine Ausmaßminderung in Abhängigkeit der Zeitdauer zwischen Freisetzung und Eintreffen der Rettungskräfte am Ereignisort angenommen. Die Zeitdauer wird in 5 Gruppen unterteilt.

6 Risikoanalyse und Risikobewertung

6.1 Grundsätzlicher Ablauf einer Risikoanalyse

Als Maß für die Bewertung der Sicherheit von Tunnelanlagen dient das auf ein Bezugssystem referenzierte Risiko. Zur Quantifizierung von Risiken sind Kenntnisse sowohl über die Häufigkeit, mit der bestimmte Ereignisse eintreten können als auch über die jeweils zu erwartenden Schadensausmaße erforderlich. Das Risiko ergibt sich aus der Verknüpfung von Schadensausmaß mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit und ist wie folgt definiert:

Risiko = Häufigkeit des Eintritts x Schadensausmaß

Der prinzipielle Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse ist in Abbildung 7 dargestellt. Die einzelnen Verfahrensschritte und Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung werden nachfolgend kurz erläutert.

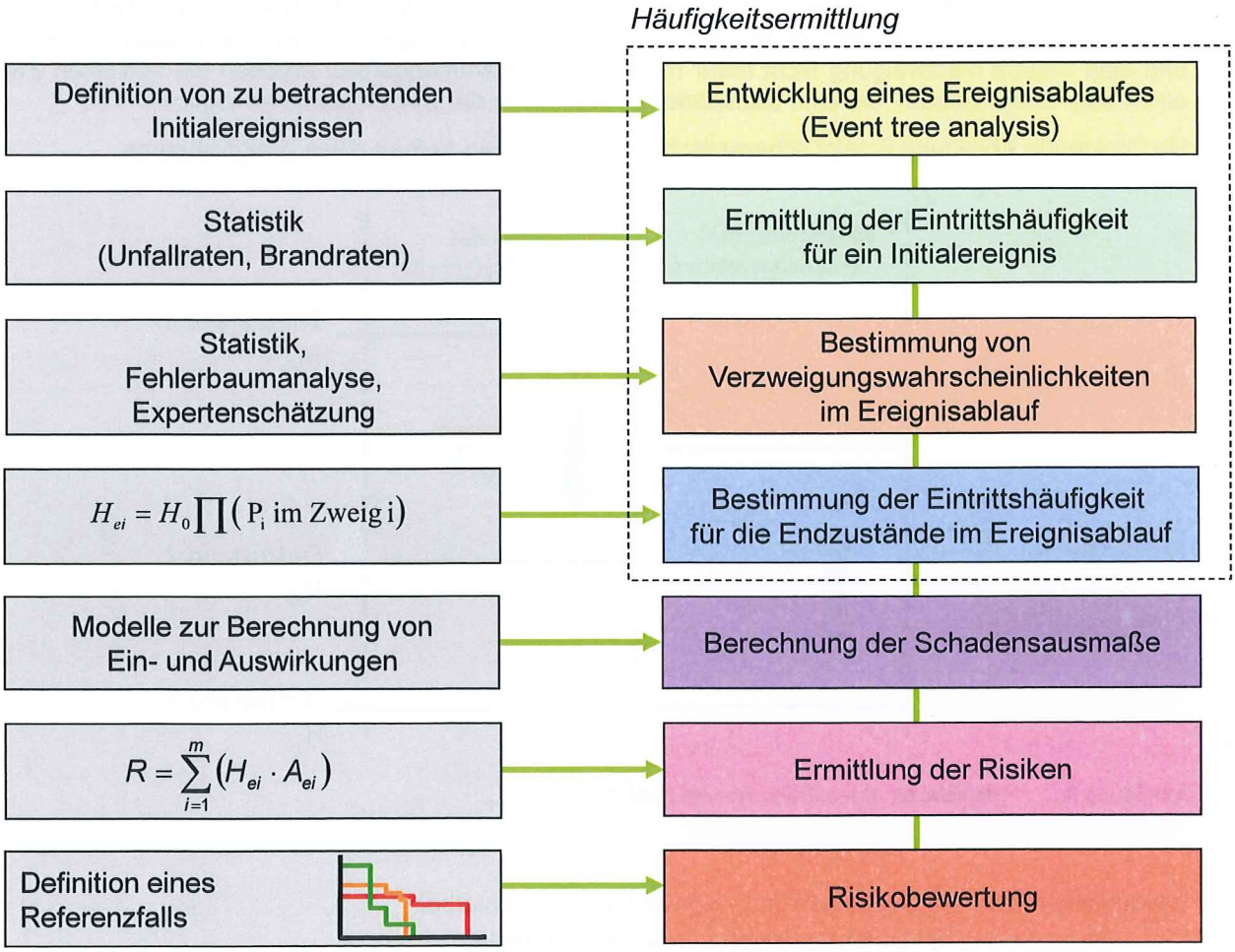

Abbildung 7: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse und Risikobewertung

6.2 Häufigkeitsermittlung

Mit Hilfe von Eintrittshäufigkeiten wird die probabilistische Komponente bei der Risikoermittlung berücksichtigt. Deren Bestimmung erfordert die nachfolgend beschriebenen Verfahrensschritte.

6.2.1 Definition von auslösenden Ereignissen

Wie bereits im Kapitel 5.2 beschrieben, werden der Sicherheitsüberprüfung entsprechend den getroffenen Festlegungen zur „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln" [SB FE 2009] mittels quantitativer Risikoanalysen und Risikobewertungen folgende auslösende Ereignisse (Initialereignisse) zugrunde gelegt:

- Kollision
- Brand infolge Kollision
- Brand infolge technischen Defekts

6.2.2 Entwicklung eines Ereignisablaufes

Ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis) werden Systemantworten in Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens abgefragt und unterschieden, ob ein Erfolg bzw. ein Versagen vorliegt. Von diesem Punkt an verzweigt sich der Ereignisablauf in weitere Zwischenzustände. Die Zwischenzustände werden analog zu denen des auslösenden Ereignisses auf Systemantworten untersucht. So entstehen bis zum Endzustand unterschiedliche Zweige des Ereignisablaufes. Ein Zweig eines Ereignisablaufes wird bis zu dem Zeitpunkt verfolgt, wo das System einen endgültigen Zustand (Endzustand) erreicht hat und eine weitere Verzweigung nicht mehr möglich ist. Zusammengefasst ergeben die einzelnen Zweige einen sog. Ereignisbaum, der eine transparente Darstellung der Einzelabläufe ermöglicht.

Nachfolgende Abbildung 8 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

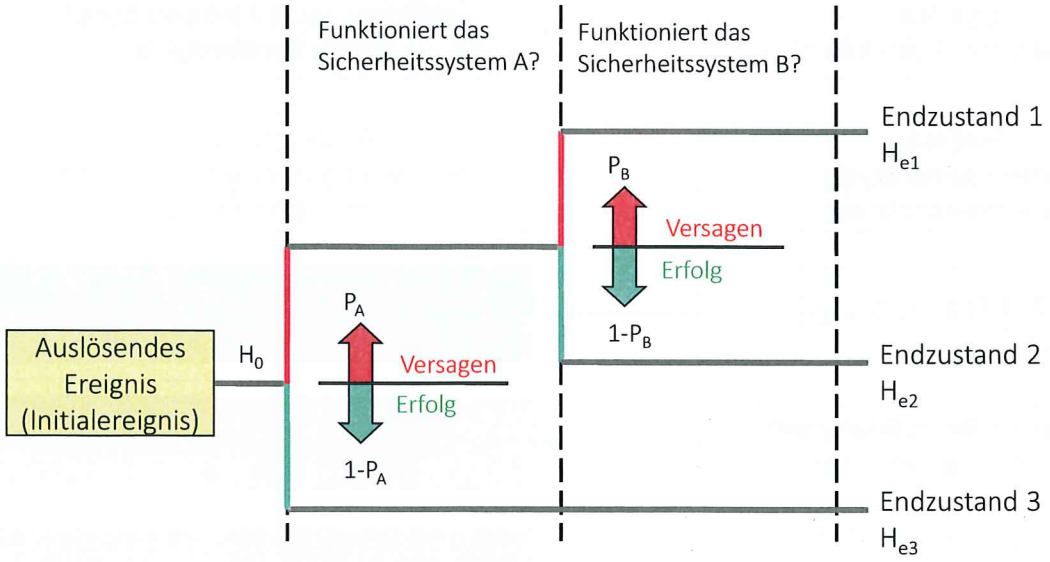

Abbildung 8: Beispiel für einen Ereignisbaum [QBRT 2006]

Wesentliche Verzweigungspunkte im Ereignisablauf bilden hierbei:

- Ereignisort (z. B. Einfahrtsbereich / Tunnelinnenstrecke)
- Verkehrsaufkommen (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr / Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion (ja / nein)
- Tunnelsperreinrichtung aktiviert (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)

- Brandbekämpfungsanlage aktiviert (ja / nein), sofern vorhanden
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Beginn der Fremdrettung

Aufgrund der Verzweigungspunkte im Ereignisablauf ergeben sich für den Untersuchungstunnel insgesamt 7.680 und für den RABT-Vergleichstunnel 3.840 Endzustände bzw. Untersuchungsszenarien (siehe Tabelle 4). Die Anzahl der Endzustände ergibt sich durch die zeilenweise Multiplikation der Entscheidungspunkte.

Untersuchungsvariante	Anzahl Röhren	Betriebszustände RV / GV	Abstand Notausgänge	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Anzahl untersuchter Brandorte	Brandleistung 5, 30, 100 MW	Brandverlauf	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich <= 30 bzw. 60 s ja / nein	Tunnelsperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Brandbekämpfungsanlage aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Fremdrettung	**Anzahl Szenarien / Endzustände**
Fehmarnbelttunnel (Nullfall)	1	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	2	2	5	**7.680**
RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall)	1	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	-	2	5	**3.840**

Tabelle 4: Untersuchungsszenarien

6.2.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis

Für die Ereignisablaufanalyse werden als Eingangswert die Eintrittshäufigkeiten für die Initialereignisse Unfall, Unfall mit Brandwirkung und technischer Defekt mit Brandwirkung benötigt. In nachfolgender Tabelle 5 sind die im Rahmen der durchgeführten Analysen ermittelten Eintrittshäufigkeiten zusammengefasst. Die Werte gelten in gleichem Maß für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) und den RABT-Vergleichstunnel.

Initialereignis		Beschreibung
[0.1]	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	Beim Initialereignis Kollision handelt es sich um die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls. Zur Bestimmung der Unfallhäufigkeit wird eine Unfallrate von 3,135 E-07 [1/Fzg*km] pro Jahr angenommen. Diese basiert auf der gemäß dem Forschungsbericht zur „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" [SB FE 2009] für Richtungsverkehrstunnel ohne Ein- und Ausfahrten bei einer zul. Geschwindigkeit von 80 km/h gültigen Unfallrate von 2,28 E-07 [1/Fzg*km] pro Jahr, die zur Berücksichtigung der im Fehmarnbelttunnel zul. Geschwindigkeit von 110 km/h um den Faktor 1,375 erhöht wurde.[4]

Initialereignis		Beschreibung
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" angegebenen Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Es wird angenommen, dass in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist.

Initialereignis		Beschreibung
[0.3]	Initialereignis Brand infolge technischen Defekts	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert auf Grundlage der im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" hergeleiteten Brandrate von 3,0 E-09 [1/Fzg*km].

Tabelle 5: Häufigkeiten H_0 von Initialereignissen

6.2.4 Bestimmung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf

Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum erfolgt auf Basis statistischer Grundlagen. Liegen keine statistischen Werte für einen Verzweigungspunkt vor, wird dessen Verzweigungswahrscheinlichkeit entweder mit Hilfe von Fehlerbäumen bestimmt oder durch Expertenmeinung abgeschätzt. Bei der Verwendung von Fehlerbäumen werden die Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf aus der Versagenswahrscheinlichkeit einzelner Systemkomponenten berechnet. Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Systemkomponenten werden über einfache UND- bzw. ODER-Verknüpfungen berücksichtigt. Über die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt sich auch die Wahrscheinlichkeit eines Erfolgs, da die Summe der Verzweigungswahrscheinlichkeiten in einem Verzweigungspunkt stets gleich eins ist. Grundsätzlich zu unterscheiden ist hierbei zwischen den Verzweigungswahrscheinlichkeiten in den Ereignisabläufen für Kollision und Brand.

6.2.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Kollision

Charakteristisch für Unfälle in Straßenverkehrstunneln ist das Auftreten folgender Unfalltypen:

- Unfalltyp 1: Fahrunfall
  (Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur)
- Unfalltyp 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall
  (Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel)

[4] Mit der Geschwindigkeitserhöhung von 80 km/h auf 110 km/h ist nicht zwingend ein linearer Anstieg der Unfallhäufigkeit zu erwarten, da die Unfallrate nicht ausschließlich durch die Geschwindigkeit beeinflusst wird, sondern auch weitere Faktoren wie z. B. die Trassierungsparameter Einfluss nehmen. Im Forschungsbericht „Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken" [EE ATS 2015] wird für zweistreifige Tunnel ohne Standstreifen und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von v = 100 km/h eine mittlere Unfallrate von 2,3 E-07 [1/Fzg*km] angegeben. Des Weiteren wird aufgezeigt, dass durch einen Seitenstreifen ein positiver Einfluss auf die Unfallrate zu erwarten ist. Die linear extrapolierte Unfallrate von 3,135 E-07 [1/Fzg*km] stellt somit einen sehr konservativen Ansatz dar.

- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr
  (Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel in einem Richtungsverkehrstunnel)
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall
  (z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Nachfolgende Tabelle 6 gibt die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) sowie den RABT-Vergleichstunnel in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensausmaß wieder.

Verzweigung im Ereignisbaum	**Beschreibung**		
[1] Unfalltyp	Basierend auf [SB FE 2009] wird für den Fehmarnbelttunnel sowie den RABT-Vergleichstunnel von folgender Verteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
	Unfalltyp 1	12,8 %	
	Unfalltyp 3	0,0 %	
	Unfalltyp 6	78,5 %	
	Unfalltyp 7	8,7 %	
[2] Ausmaßverteilung	Gemäß dem Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" wird von folgender Schadensausmaßverteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
	Unfalltyp 1	99,25 %	Keine Todesopfer
		0,59 %	1 Todesopfer
		0,15 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 3	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	1 Todesopfer
		0,07 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 6	99,00 %	Keine Todesopfer
		0,72 %	1 Todesopfer
		0,27 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 7	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	1 Todesopfer
		0,07 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer

Tabelle 6: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision

6.2.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Brand

Die dem Ereignisablauf beim Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) sowie dem RABT-Vergleichstunnel infolge eines Brandes zugrundeliegenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten sind in nachfolgender Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt und beschrieben.

<table>
<tr><th colspan="2">Verzweigung im Ereignisbaum</th><th>Beschreibung</th></tr>
<tr><td>[1]</td><td>5 MW /30 MW / 100 MW</td><td>Ausgehend von einem Schwerverkehrsanteil von 15,11 % wird angenommen, dass 84,89 % der Brände infolge Kollision der Fahrzeugart Pkw zugeordnet werden können. Für den verbliebenen Anteil werden 30 MW und 100 MW-Brände mit nachfolgender Wahrscheinlichkeit berücksichtigt.
<table>
<tr><td>Brandlast</td><td>Wahrscheinlichkeit</td></tr>
<tr><td>5 MW</td><td>84,89 %</td></tr>
<tr><td>30 MW</td><td>14,20 %</td></tr>
<tr><td>100 MW</td><td>0,91 %</td></tr>
</table>
Die gleiche Verteilung gilt für die Selbstzündung infolge eines technischen Defekts.</td></tr>
<tr><td>[2]</td><td>Verkehrsaufkommen
je Zeitraum
Tag / Nacht</td><td>Einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß hat die Anzahl der potenziell betroffenen Personen im Ereignisfall. Zur Berücksichtigung unterschiedlichen Personenaufkommens werden daher Zeiten mit hohem und mit schwachem Verkehrsaufkommen (Tages- bzw. Nachtbelastung) differenziert betrachtet. Auf Basis der Angaben zum Verkehr wird die Verteilung des Verkehrs in die Bereiche Tag / Nacht wie folgt abgeschätzt.
<table>
<tr><td>Zeitbereich</td><td>Verteilung Gesamtverkehrsaufkommen</td></tr>
<tr><td>Tag (6-22 Uhr)</td><td>83,33 %</td></tr>
<tr><td>Nacht (22-6 Uhr)</td><td>16,67 %</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>[3]</td><td>Verkehrszustand
Fließender Verkehr / Vollstau</td><td>Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist direkt abhängig vom vorherrschenden Verkehrszustand. Es wird daher zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau unterschieden.
Da für den Tunnel keine erhöhten Stauaufkommen zu verzeichnen sind, wird von 50 Staustunden pro Jahr ausgegangen, was etwa 0,57 % entspricht. Freier Verkehr ist demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,43 % zu erwarten. Dabei wird davon ausgegangen, dass Stau nur während der Tagstunden auftritt.</td></tr>
<tr><td>[4]</td><td>Detektion
Ja / Nein</td><td>Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99 % erfolgt. In dem verbleibenden 1 % der Fälle wird ein Brand nicht erkannt.
Aufgrund des zusätzlichen AID-Systems zur Brandfrüherkennung wird beim Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) eine Detektionszeit von 30 s berücksichtigt.
Die RABT fordern die Erkennung eines Brandes innerhalb von 60 Sekunden nach Brandbeginn. Dies bildet damit die Grundlage für den RABT-Vergleichstunnel.</td></tr>
<tr><td>[5]</td><td>Tunnelsperrung
Ja / Nein</td><td>Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führen unter Umständen dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in einem von hundert Fällen (1 %) eintritt.</td></tr>
<tr><td>[6]</td><td>Lüftungssystem
Ja / Nein</td><td>Die Lüftung des Fehmarnbelttunnels (Untersuchungstunnel) erfolgt ausschließlich über Strahlventilatoren. Nach erfolgter Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Die erforderliche Lüftungsleistung steht gemäß den Vorgaben der RABT 60 s nach Detektion, d. h. hier 90 s nach Brandbeginn, zur Verfügung.
Für den RABT-Vergleichstunnel, welcher über eine Rauchabsaugung verfügt, steht die erforderliche Lüftungsleistung 90 s nach Detektion, in diesem Fall also 150 s nach Brandbeginn zur Verfügung.
Es wird in beiden Fällen die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) das entsprechende Lüftungsprogramm nicht aktiviert wird.</td></tr>
<tr><td>[7]</td><td>Brandbekämpfungsanlage
Ja / Nein</td><td>Die Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage erfolgt mit der Detektion eines Brandes. Analog zur Brandlüftung steht die Löschleistung 60 s nach der Detektion, d. h. 90 s nach Brandbeginn, zur Verfügung. Dadurch werden an die Brandbekämpfungsanlage dieselben Anforderungen gestellt, wie sie die RABT für ein Lüftungssystem fordern. Es wird die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) das zur Löschung erforderliche Steuerungsprogramm nicht aktiviert wird.
Eine Brandbekämpfungsanlage wird nur für den geplanten Tunnel der Fehmarnbeltquerung (Untersuchungstunnel) berücksichtigt, nicht aber beim RABT-Vergleichstunnel.</td></tr>
</table>

<table>
<tr><th colspan="2">Verzweigung im Ereignisbaum</th><th>Beschreibung</th></tr>
<tr><td>[8]</td><td>Erhöhtes Ausmaß
Ja / Nein</td><td>Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, mit in das Ereignis involviert sind. Da der Eintritt dieses Ereignisses stets zu einer Vergrößerung des Schadensausmaßes führen kann, ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen. Basierend auf dem Busanteil am Verkehrsaufkommen wird davon ausgegangen, dass in 0,82 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes wird, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal eine Menge von 20 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.</td></tr>
<tr><td>[9]</td><td>Fremdrettung</td><td>Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Zur Berücksichtigung der Fremdrettung wird für in Abhängigkeit von der Eintreffzeit eine Ausmaßminderung vorgenommen. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.
<table>
<tr><th>Eintreffzeit [min]</th><th>Eintreffwahrscheinlichkeit [%]</th><th>Ausmaßminderung [%]</th></tr>
<tr><td>< 5</td><td>0</td><td>30</td></tr>
<tr><td>< 10</td><td>0</td><td>20</td></tr>
<tr><td>< 15</td><td>20</td><td>10</td></tr>
<tr><td>< 20</td><td>50</td><td>5</td></tr>
<tr><td>≥ 20</td><td>30</td><td>0</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

Tabelle 7: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes

6.2.5 Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände im Ereignisablauf werden über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$H_{e,i} = H_0 \cdot \prod P_i$$

mit:

$H_{e,i}$: Häufigkeit der Endzustände

H_0: Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses

P_i: Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i

6.3 Berechnung der Schadensausmaße

Während Schadensausmaße für die häufigeren Ereignisse mit eher geringen Unfallfolgen über entsprechende Unfallstatistiken bestimmt werden können, erfordern seltenere Ereignisse mit tendenziell höheren Schadensausmaßen aufgrund fehlender Datengrundlage Modelle zur Bestimmung von Ein- und Auswirkungen auf Bauwerk und Nutzer.

6.3.1 Schadensausmaße infolge Kollision

Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird auf Grundlage des im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" [SB FE 2009] vorgegebenen Zusammenhangs gemäß nachfolgender Tabelle 8 bestimmt

Schadensausmaßklasse	Erwartetes Ausmaß
Keine Todesopfer	0 Todesopfer
1 Todesopfer	1 Todesopfer
2-3 Todesopfer	2 Todesopfer
4-9 Todesopfer	5 Todesopfer
10-30 Todesopfer	15 Todesopfer
>30 Todesopfer	35 Todesopfer

Tabelle 8: Schadensausmaße infolge Kollision

6.3.2 Schadensausmaße infolge Brand

6.3.2.1 Ermittlung von Einwirkungen (impacts)

Die Ermittlung von Einwirkungen infolge von Bränden und Schadgasfreisetzungen erfordert den Einsatz räumlich und zeitlich hochauflösender numerischer Verfahren. Die numerischen Berechnungen erfolgen hierbei in drei Raumdimensionen durch Lösen der zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stofferhaltung. Dadurch lassen sich Aussagen zu den Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum treffen.

Der eingesetzte CFD-Code Fire Dynamics Simulator (FDS) erlaubt die Abbildung sämtlicher für lüftungstechnische Fragestellungen relevanter Einrichtungen. Neben der Abbildung komplizierter Geometrien sind damit beliebige Ventilationsbedingungen realisierbar. Das implementierte Brandmodell erlaubt die realitätsnahe Wiedergabe von spezifischen Energie- und Rauchfreisetzungen. Mit Hilfe eines Lagrangeschen Partikelmodells lässt sich die Wirkung von Wasser auf den Brandverlauf abbilden. Darüber hinaus lassen sich temperatur- und konzentrationsabhängige Detektoren nachbilden, wodurch das Regeln einer Lüftungsanlage sowie die Ansteuerung einer Brandbekämpfungsanlage simuliert werden kann.

Zur Durchführung der numerischen Berechnungen sind im Wesentlichen folgende drei Schritte erforderlich:

2. Preprocessing (Dateneingabe)
3. Processing (Berechnung)
4. Postprocessing (Datenausgabe und Visualisierung)

Das Preprocessing umfasst das Modellieren der Tunnelbauwerke mit ihren geometrischen und strömungsmechanischen Eigenschaften. Hierzu ist zunächst eine Diskretisierung des Rechenraums durch Zerlegung in endlich viele Punkte (Knoten) durchzuführen. Die Auflösung ist hierbei abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Speicher, Rechenleistung) sowie der gewünschten Genauigkeit der geometrischen Abbildung und der Rechenergebnisse.

Nach Festlegung der räumlichen Auflösung werden unter Berücksichtigung ergebnisneutraler Systemvereinfachungen folgende tunnelspezifische Merkmale, modelliert:

- Tunnelgeometrie (Quer- und Längsschnitt)
- Lüftungstechnische Einrichtungen (Ventilatoren)
- Brandbekämpfungsanlage
- Detektoren
- Fahrzeuge
- Brandherd

Basis für die Umsetzung der jeweiligen Steuerungen bilden Gutachten zur Lüftung und zum Verkehrsaufkommen bzw. -ablauf. Die Auslegung der Brandbekämpfungsanlage erfolgt in Anlehnung der Erkenntnisse aus dem SOLIT² - Projekt [SOLIT² 2012]. Für den Fehmarnbelttunnel werden je Löschabschnitt 16 Düsen, mit einer Beaufschlagung von etwa 867 l angenommen.

Nachfolgende Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt aus dem Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) als 3D-Modellierung mittels FDS. Daraus geht die Anordnung der Strahlventilatoren sowie der Düsen der Brandbekämpfungsanlage hervor.

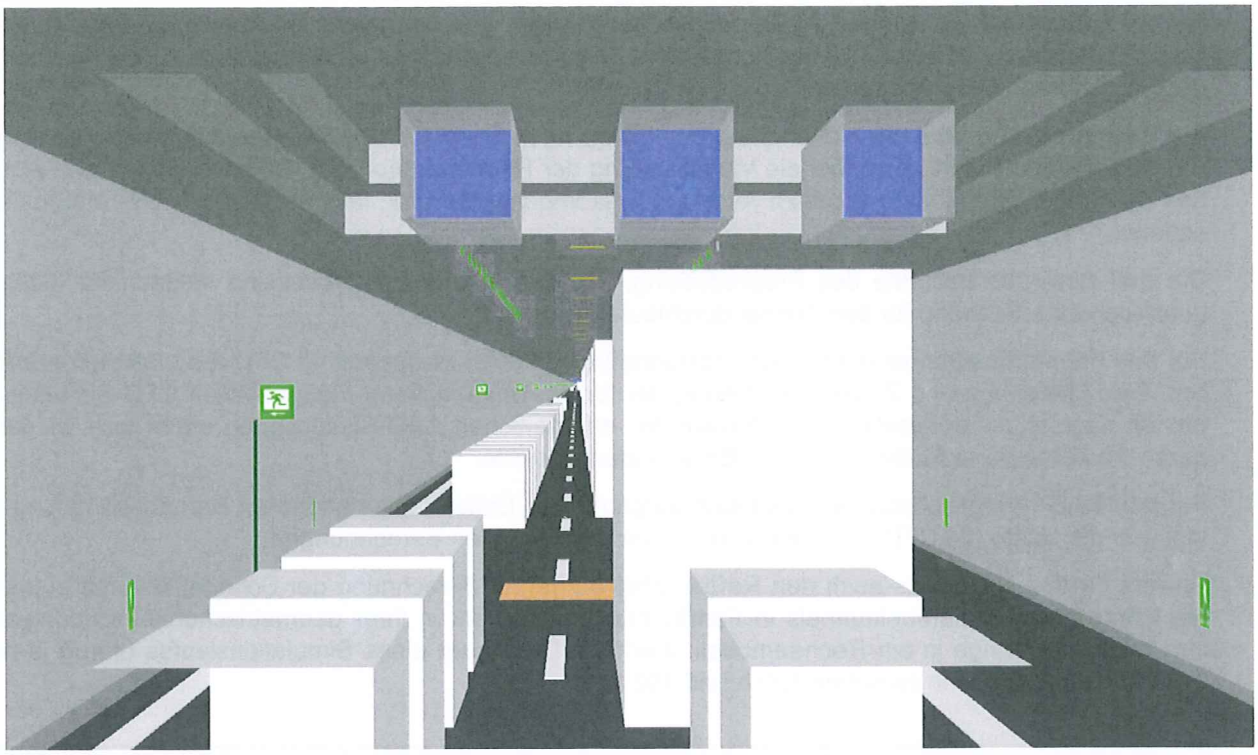

Abbildung 9: **3D-Modellierung des Fehmarnbelttunnels mit mech. Längslüftung und stationärer Brandbekämpfungsanlage**

Für den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) entfällt die Brandbekämpfungsanlage, dafür sind an der Tunneldecke einzeln steuerbare Klappen der Rauchabsaugung angeordnet. Auch der breitere Querschnitt mit beidseits angeordneten Notgehwegen ist in Abbildung 10 zu erkennen.

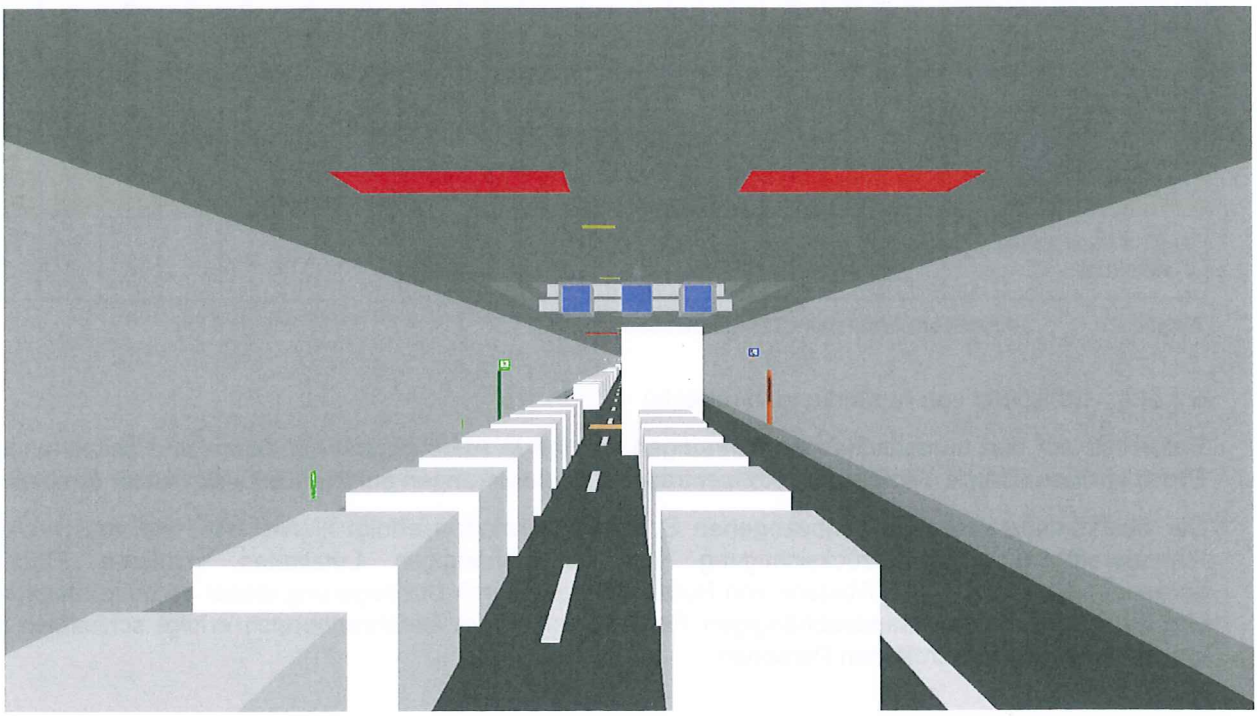

Abbildung 10: **3D-Modellierung des RABT-Vergleichstunnels mit mechanischen Längslüftung und Rauchabsaugung**

Im Processing erfolgt die eigentliche Berechnung durch den Prozessor. Die erforderliche Rechenzeit ist hierbei direkt abhängig von der Größe des Rechengebietes und der gewählten Auflösung. Eine Verdopplung der Auflösung in allen 3 Dimensionen führt beispielsweise zu einer Verachtfachung der Rechenzeit und des erforderlichen Speichers.

Als Postprocessing wird die Behandlung der Daten nach Durchführung der Berechnungen bezeichnet. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die Visualisierung der Rechenergebnisse. Dadurch lassen sich Aussagen über die Wirkung von einzelnen Ausstattungskomponenten und, falls erforderlich, von Maßnahmen erzielen.

Die drei Simulationsschritte des Preprocessing, Processing und Postprocessing müssen für jedes zu untersuchende Szenario für den Tunnel durchlaufen werden.

Für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) sind hierzu insgesamt 48 CFD-Simulationen erforderlich. Eine Herleitung und Zusammenstellung der für die Untersuchung maßgeblichen CFD-Simulationen enthält nachfolgende Tabelle 9. Die Anzahl der erforderlichen CFD-Simulationen ergibt sich wiederum durch die zeilenweise Multiplikation der Entscheidungspunkte.

Für den RABT-Vergleichstunnel ergibt sich aufgrund des Entfalls der stationären Brandbekämpfungsanlage nur die Hälfte (24 CFD-Simulationen) an durchzuführenden Berechnungen.

Sowohl für den Nullfall als auch den Referenzfall wurde zur Berechnung der Schadensausmaße jeweils die Röhre des Fehmarnbelttunnels in Fahrtrichtung Dänemark in ihrer geometrischen Ausbildung über ihre komplette Länge in ein Rechenmodell überführt. Die Dauer eines Simulationslaufes betrug je nach Untersuchungsszenario zwischen 120 h und 192 h.

Untersuchungsvariante	Anzahl Röhren	Betriebszustände RV / GV	Abstand Notausgänge	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Anzahl untersuchter Brandorte	Brandleistung 5, 30, 100 MW	Brandverlauf	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich ja / nein[5]	Tunnelsperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein[6]	Brandbekämpfungsanlage aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Fremdrettung	**Anzahl Szenarien / Endzustände**
Fehmarnbelttunnel (Nullfall)	1	1	1	1	1	3	2	1	2	1	1	2	2	1	1	**48**
RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall)	1	1	1	1	1	3	2	1	2	1	1	2	-	1	1	**24**

Tabelle 9: Anzahl erforderlicher CFD-Simulationen

6.3.2.2 Ermittlung von Auswirkungen (effects)

Basierend auf den numerischen Berechnungen werden in Abhängigkeit der raum- und zeitabhängigen Einwirkgrößen (Druck, Temperatur, Konzentrationen) Auswirkungen auf Bauwerk und Nutzer ermittelt.

Die Bestimmung von personenbezogenen Schadensausmaßen erfolgt hierbei mit Hilfe von Selbstrettungsbereichen unter Berücksichtigung von dosisabhängigen Letalitäten, mittleren Fluchtgeschwindigkeiten sowie dem Abstand von Notausgängen. Durch Überlagerung dieser Selbstrettungsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl im Gefahrenbereich erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen.

[5] Fehmarnbelttunnel: ≤ 30 s; RABT-Vergleichstunnel: : ≤ 60 s

[6] Fehmarnbelttunnel: ≤ 60 s; RABT-Vergleichstunnel: : ≤ 90 s

Nachfolgende Abbildung 11 bzw. Abbildung 12 zeigen exemplarisch die aus einem Fahrzeugbrand im Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) bzw. im RABT-Vergleichstunnel aufgrund der sich einstellenden Sichtbedingungen resultierenden Selbstrettungsbereiche. Zur besseren grafischen Darstellung wurde dabei nur ein Ausschnitt des Tunnels dargestellt. Der Brandbeginn erfolgt hierbei bei Simulationssekunde 60. Die erfolgreiche Branddetektion (Alarm) erfolgt für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) 30 Sekunden nach Brandbeginn bei Simulationssekunde 90, für den RABT-Vergleichstunnel erst nach 60 Sekunden bei Simulationssekunde 120. In Zusammenhang mit den unterschiedlichen Notausgangsabständen und den unterschiedlichen Aktivierungszeiten der Ventilationssysteme führt dies dann auch zu unterschiedlichen Selbstrettungsbereichen für die Betrachtungsfälle. Sämtliche weiteren Darstellungen sind dem Anhang zu entnehmen.

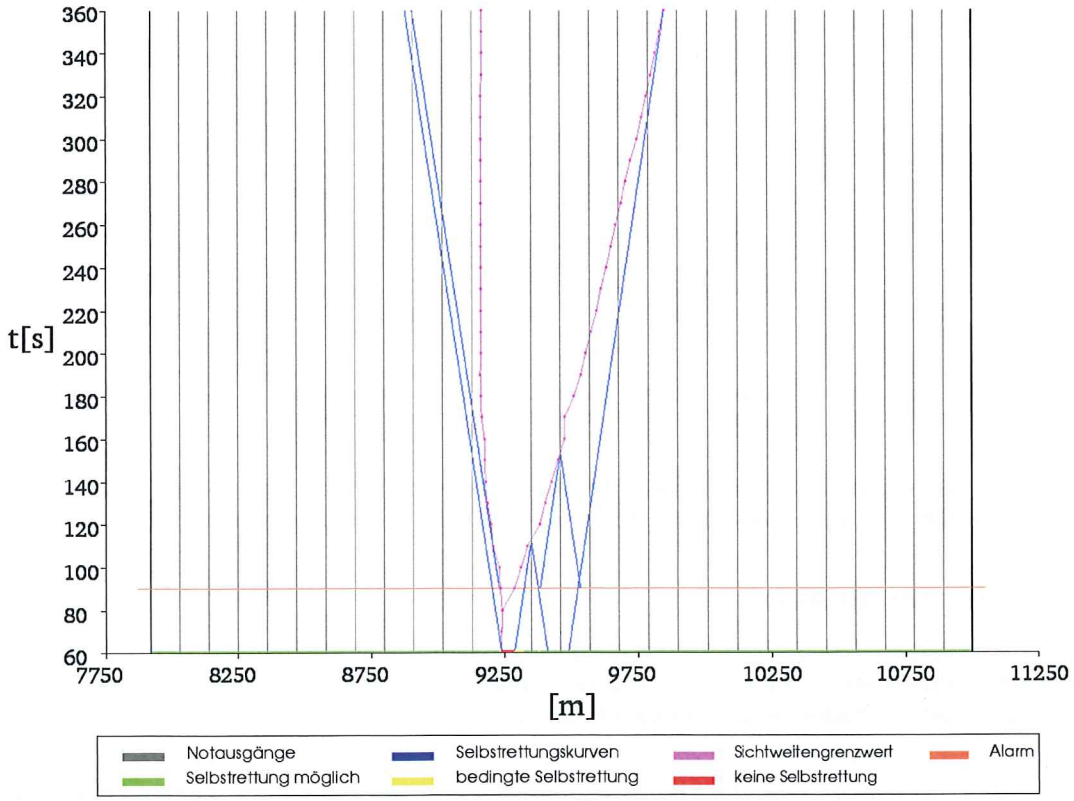

Abbildung 11: **Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Untersuchungstunnel (Nullfall) (30 MW, Stau, 110 m NA-Abstand, aktivierte Brandlüftung (Längsventilation), ohne Brandbekämpfungsanlage)**

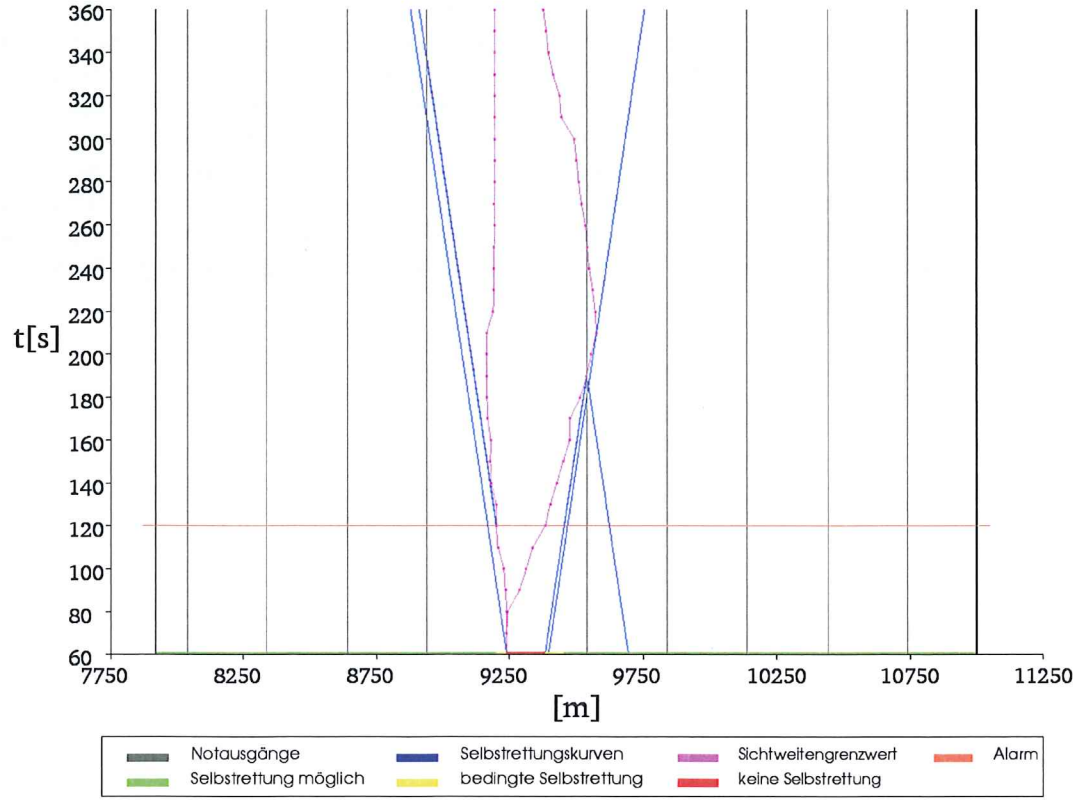

Abbildung 12: **Darstellung von Selbstrettungsbereichen im RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) (30 MW, Stau, 300 m NA-Abstand, aktivierte Brandlüftung (Rauchabsaugung))**

6.4 Ermittlung der Risiken

Auf Basis der ermittelten Häufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf und den korrespondierenden Schadensausmaßen erfolgt die Berechnung der Risiken. Die Ergebnisse der Risikoermittlung werden sowohl als Punktwert (Schadenserwartungswert) als auch in Form von HA-Diagrammen (Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen) ausgegeben.

In nachfolgender Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung für den Fehmarnbelttunnel (Untersuchungstunnel) in seiner geplanten Form als Summenhäufigkeitskurven dargestellt. Die Kurven repräsentieren das Gesamtrisiko einer Tunnelröhre aus der Überlagerung der Einzelrisiken infolge Kollision und Brand. Für den RABT-Vergleichstunnel sind die entsprechenden Einzelkurven sowie die Gesamtkurve in der folgenden Abbildung 14 dargestellt.

Aufgrund der gleichen Verkehrszahlen und relevanten Randbedingungen wie z. B. die zulässige Höchstgeschwindigkeit ergeben sich für die Unfallrisiken ohne Brände (rote Kurven), keine Unterschiede. Bei den Brandereignissen (blaue und violette Kurven) ergeben sich jedoch signifikante Differenzen.

Für den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) liegt im Vergleich zum Untersuchungstunnel (Nullfall) ein höheres Risiko infolge von Brandereignissen vor. Bedingt durch die schlechteren Fluchtbedingungen für die Tunnelnutzer im Ereignisfall ergeben sich erhöhte Schadensausmaße in den jeweiligen Szenarien.

Insbesondere die längeren Detektionszeit und die Zeit, bis das jeweilige Lüftungssystem seine volle Wirkung erreicht hat, führen zu den signifikanten Unterschieden. Der Zeitraum beträgt für den Untersuchungsfall (Nullfall) 90 s und für den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) 150 s nach Brandbeginn.

Zusätzlich sind im Fehmarnbelttunnel aufgrund der geringeren Notausgangsabstände (110 m) deutlich bessere Fluchtbedingungen als beim Vergleichstunnel (300 m) für die Tunnelnutzer im Ereignisfall vorhanden. Auch die im Fehmarnbelttunnel zusätzlich installierte Brandbekämpfungsanlage kann insbesondere im Hinblick auf kleine bis mittlere Brandszenarien die Brandentwicklung positiv beeinflussen.

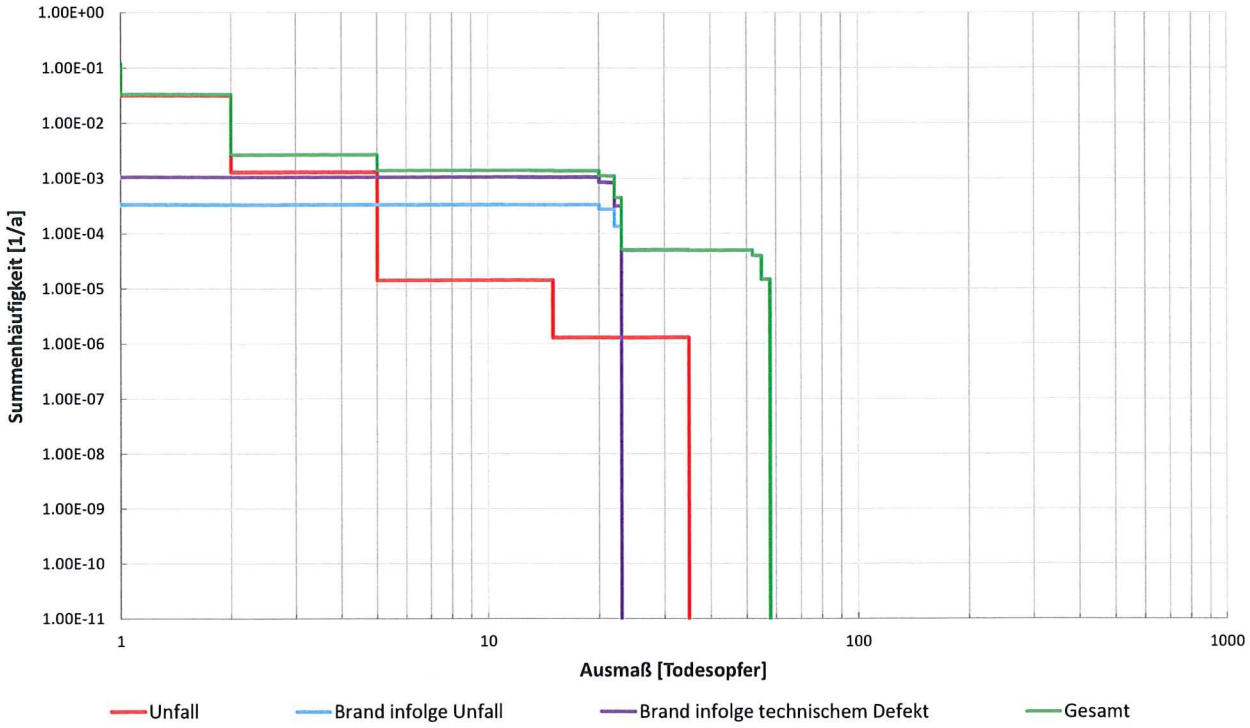

Abbildung 13: **HA-Diagramm des Untersuchungstunnels (Nullfall) für die Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts**

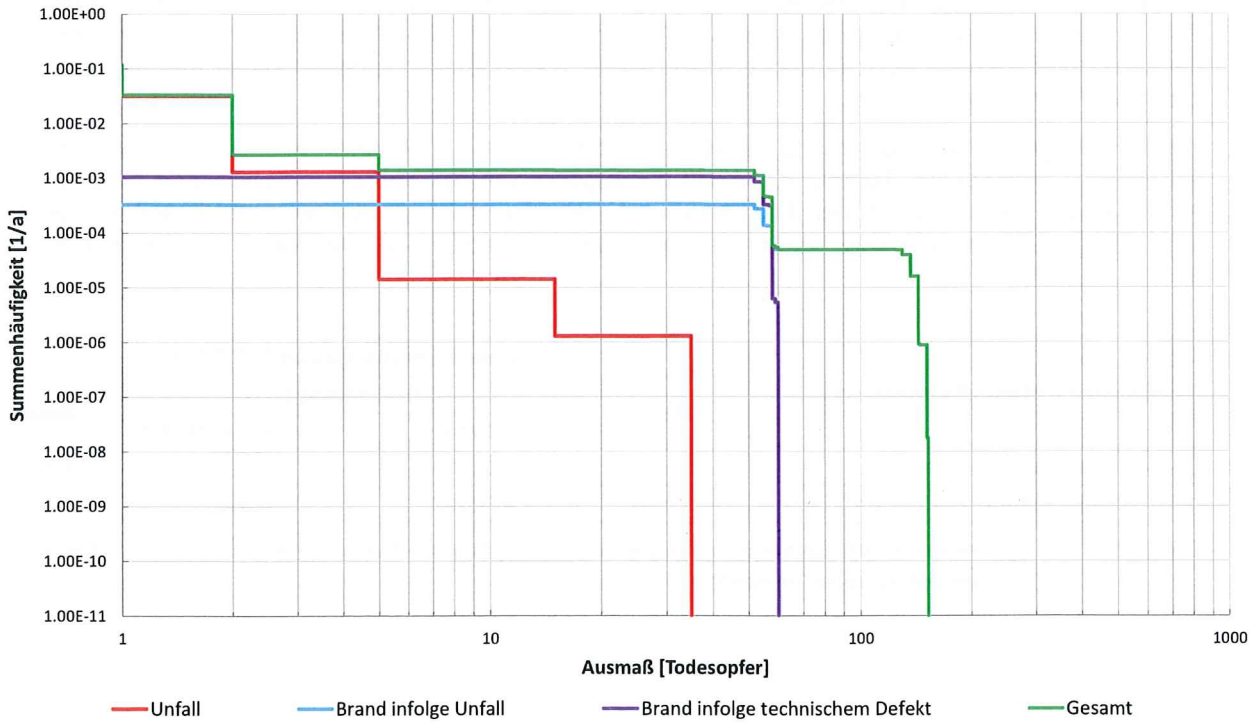

Abbildung 14: **HA-Diagramm des RABT-Vergleichstunnels (Referenzfall) für die Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts**

Zur besseren Vergleichbarkeit stellt nachfolgende Abbildung 15 die Unterscheide in den Gesamtrisiken für den Untersuchungstunnel (Nullfall) und den RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall) grafisch dar.

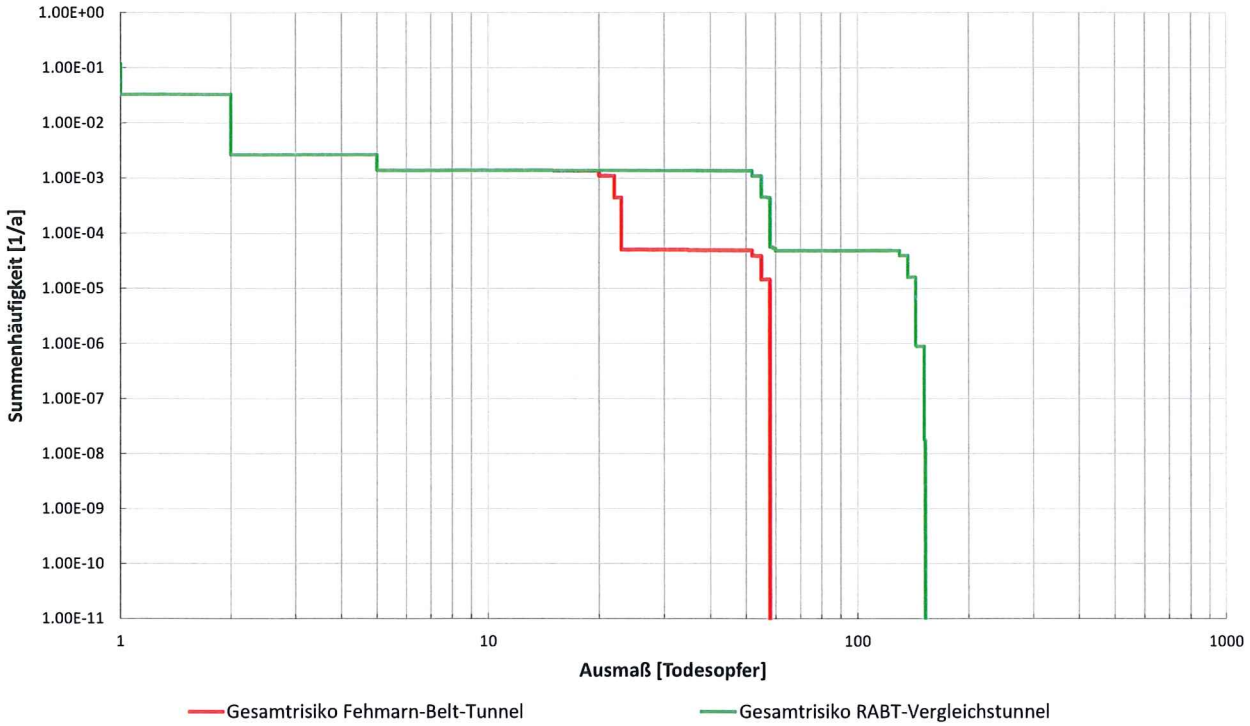

Abbildung 15: HA-Diagramm der Gesamtrisiken des Fehmarnbelttunnels sowie des RABT-Vergleichstunnels

Bei den geringeren Schadensausmaßen dominieren die Risikoanteile infolge von Unfällen ohne Brand im Bereich von Schadensausmaßen bis 20 Personen den Kurvenverlauf. Da sich für beide Tunnel keine Unterschiede in den Unfallrisiken ergeben, sind die Kurven hier auch deckungsgleich. Erst im weiteren Verlauf bestimmen die Brandrisiken den Kurvenverlauf. Hier zeigen sich aufgrund der höheren sicherheitstechnischen Tunnelausstattung des Fehmarnbelttunnels Vorteile im Risiko. Die maximalen Schadensausmaße bleiben deutlich unter 100 betroffenen Personen, wohingegen sie für den Vergleichstunnel bis zu 150 Personen betragen.

Neben der grafischen Darstellung lassen sich die Risiken auch über Schadenerwartungswerte beschreiben. Nachfolgende Tabelle 10 enthält die zugehörigen Schadenserwartungswerte für eine Tunnelröhre, welche getrennt nach den Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts aufgeführt sind. Zudem ist der Gesamt-Schadenserwartungswert für eine Röhre berechnet.

Straßentunnel (Röhre FR Dänemark)	Schadenerwartungswert [$^{Todesopfer}/_{a}$]			
	Unfall	Brand infolge		Gesamt
		Unfall	technischen Defekt	
Untersuchungstunnel (Nullfall)	0,1545	0,0088	0,0229	0,1863
RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall)	0,1545	0,0222	0,0580	0,2347

Tabelle 10: Schadenserwartungswerte für Ereignisarten Unfall, Brand infolge Kollision und Brand infolge technischen Defekts (eine Tunnelröhre)

6.5 Risikobewertung

Für die Risikobewertung wird nun das Risiko des Untersuchungstunnels (Nullfall) mit dem des RABT-Vergleichstunnels (Referenzfall) verglichen. Für die risikoanalytische Betrachtung wurde die Tunnelröhre in Fahrtrichtung Dänemark ausgewählt, die Ergebnisse sind aber aufgrund der Gleichartigkeit der Gegenröhre auf diese übertragbar. Für die Darstellung des Gesamtrisikos wurden die Einzelrisiken daher verdoppelt.

In nachfolgender Tabelle 11 sind die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung für den Fehmarnbelttunnel ermittelten Schadenserwartungswerte den Referenzwerten des RABT-Vergleichstunnels gegenübergestellt.

Straßentunnel	Schadenerwartungswert [$^{Todesopfer}/_{Jahr}$]			
	Unfall	Brand infolge		Gesamt
		Unfall	technischen Defekts	
Untersuchungstunnel (Nullfall)	0,3090	0,0177	0,0459	0,3725
RABT-Vergleichstunnel (Referenzfall)	0,3090	0,0445	0,1161	0,4695
Unterschreitung des Referenzrisikos um:	-	**60,22 %**	**60,47 %**	**20,66 %**

Tabelle 11: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Schadenserwartungswerte mit Referenzwert

Es wird deutlich, dass der Gesamt-Schadenserwartungswert durch Personenschäden infolge von Unfällen dominiert wird. Dadurch, dass der Fehmarnbelttunnel einen relativ geringen Notausgangsabstand von ≤ 110 m sowie weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen wie z. B. eine ortsfeste, stationäre automatische Brandbekämpfungsanlage aufweist, fällt der Risikoanteil der Szenarien mit Brandentwicklung verhältnismäßig gering aus.

7 Zusammenfassung der quantitativen Risikoanalyse

Um eine Aussage zur Sicherheit des geplanten Fehmarnbelttunnels in Bezug auf die Anforderungen der RABT zu erhalten, wurde ein Relativvergleich des Sicherheitsniveaus des geplanten Straßentunnels mit dem eines RABT-Vergleichstunnels durchgeführt. Für den Vergleichstunnel wurde eine bauliche und betriebstechnische Ausstattung gemäß den RABT und eine mechanischen Längslüftung mit einer Rauchabsaugung über einzeln ansteuerbare Klappen und Abluftkanal angesetzt.

Die Bestimmung des Sicherheitsniveaus für den Fehmarnbelttunnel und den RABT-Vergleichstunnel erfolgte mittels einer quantitativen Risikoanalyse, durch die sowohl Schadensausmaße als auch deren Eintrittshäufigkeiten Berücksichtigung finden. Als Maß für die Sicherheit dient hierbei das Risiko, das aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen resultiert.

Die Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten erfolgte mit Hilfe von Ereignisbäumen (Event Trees), in denen ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis) sämtliche mögliche Ablaufvarianten bis zu einem Endzustand abgebildet wurden. Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf wurde auf Basis von statistischen Daten vorgenommen. Durch die Verknüpfung der Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten konnte schließlich die zu erwartende Häufigkeit eines Endzustandes berechnet werden. Die Eintrittshäufigkeiten für das Initialereignis „Unfall" wurde über Unfallkenngrößen ermittelt.

Das Schadensausmaß zu den jeweiligen Endzuständen der beiden Untersuchungsvarianten wurde für Unfälle (Kollisionen ohne Brand) über unfalltypabhängige Schadensausmaßverteilungen und für die Brandfälle mittels Simulationsrechnungen ermittelt. Für die Durchführung der Simulationsrechnungen wurde die innenliegende Röhre des Fehmarnbelttunnels in Fahrtrichtung Dänemark über die gesamte Länge unter Berücksichtigung strömungsmechanisch relevanter Einflüsse durch Ventilatoren (Längslüftung bzw. Längslüftung mit Rauchabsaugung), Fahrzeuge, Querschnittsgestaltung und Längsneigung sowie der Wirkung einer stationären automatischen Brandbekämpfungsanlage modelliert. Die numerischen Berechnungen erfolgten in drei Raumdimensionen durch Lösen der zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stofferhaltung. Dadurch ließen sich Aussagen zu den Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum treffen.

Zur Bestimmung der jeweiligen Schadenausmaße wurden gemäß RABT Brandleistungen von 5 MW für einen Pkw-Brand, 30 MW für einen Bus-/Lkw-Brand sowie 100 MW für einen größeren LKW-Brand zugrunde gelegt.

Insgesamt waren für den Fehmarnbelttunnel und den RABT-Vergleichstunnel 72 CFD-Berechnungen erforderlich, damit für die verschiedenen Untersuchungsszenarien entsprechende Ausmaßberechnungen durchgeführt werden konnten. Dies entsprach bei der gewählten Gitterweite von 0,5 m einer Rechenzeit zwischen 120 h und 192 h pro Rechenlauf.

Die Ereignisbäume wiesen insgesamt 11.520 Endzustände auf, für die die Eintrittshäufigkeiten sowie das jeweilige Schadensausmaß separat ermittelt werden mussten. Verzweigungspunkte bildeten hierbei das Verkehrsaufkommen bei Tag und Nacht, der Verkehrszustand, die Detektion, Alarmierung von Tunnelnutzern, Aktivierung der Tunnelsperreinrichtungen, Aktivierung des Lüftungssystems, die Aktivierung der stationären Brandbekämpfungsanlage im Fall des Fehmarnbelttunnels, Beteiligung von Bussen sowie der Beginn der Fremdrettung.

Die Ermittlung der zugehörigen Schadensausmaße erfolgte mit einem Flucht- und Evakuierungsmodell, mit dem berechnete Einwirkungen durch Rauch und Wärme sowie die Einflüsse aus Fluchtgeschwindigkeit, Alarmierung, Notausgängen und Personenaufkommen berücksichtigt werden können.

Diese detaillierte Abbildung der Ereignisabläufe sowie die hochauflösenden numerischen Berechnungen sind notwendig, um das komplexe Zusammenspiel von Tunnelnutzern, Sicherheitseinrichtungen und Fremdrettung abbilden und quantifizieren zu können.

Im Rahmen der durchgeführten quantitativen Risikoanalyse wurde für den Fehmarnbelttunnel ein Schadenerwartungswert von 0,3725 $^{\text{Todesopfern}}/_{\text{Jahr}}$ für das Prognosejahr 2030 ermittelt. Die Ergebnisse der zugehörigen Simulation und Berechnung des RABT-konformen Vergleichstunnels für die Fehmarnbeltquerung zeigen auf, dass das zu erwartenden Risiko des geplanten Tunnelbauwerks unterhalb des Risikos eines nach den Vorgaben der RABT ausgestatteten Vergleichstunnels liegt. Es wurde zudem verdeutlicht, dass die zu erwartenden Gesamtrisiken durch die Personenschäden infolge von Unfällen dominiert werden.

Für das Prognosejahr 2030 wird das Referenzrisiko des RABT-konformen Vergleichstunnels hinsichtlich der Brandrisiken sowohl bei Bränden infolge Unfalls als auch bei Bränden infolge von technischen Defekten um rund 60 % unterschritten. Das Gesamtrisiko des geplanten Fehmarnbelttunnels unterschreitet das Referenzrisiko eines nach Vorgaben der RABT ausgestatteten Tunnels um ca. 20 %. Dies bedeutet, dass der geplante Fehmarnbelttunnel ein um ca. 20 % höheres Sicherheitsniveau gegenüber einem nach den Vorgaben der RABT ausgestatteten Vergleichstunnels aufweist.

8 Fazit der Risikoanalysen (QRA und ORA)

Für den geplanten Fehmarnbelttunnel liegen mit der vorstehenden Ausarbeitung zwei Risikoanalysen vor. Zum einen die Betriebskostenanalyse (Operational Risk Analysis [ORA 2016]), die der dänischen Methodik zur Erstellung von Risikoanalysen entspricht, und zum anderen die Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln (QRA) gemäß deutschen Vorgaben [SB FE 2009].

Der maßgebliche Parameter zur Ermittlung und Bewertung des zu erwartenden Risikos stellen sowohl nach dänischer als auch nach deutscher Vorgehensweise für den Straßentunnel Personenschäden (Todesopfer) dar. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch in der Bewertung. Im dänischen Verfahren wird die Einhaltung eines aus den vorliegenden Statistiken abgeleiteten Risikoakzeptanzkriteriums (absoluter Grenzwert) überprüft, wo hingegen im deutschen Verfahren ein Relativvergleich zwischen der Ausführung des geplanten Tunnels und einem RABT-konformen Tunnel (relativer Grenzwert) aufgezeigt wird.

Aufgrund der im dänischen Verfahren abgeleiteten Ansätze ergibt sich für den Straßentunnel ein Schadenserwartungswert von 0,154 Todesopfern/a, der sich aus den Erwartungswerten von 0,153 Todesopfern/a infolge von Verkehrsunfällen, $9{,}4 * 10^{-5}$ Todesopfern/a infolge von Bränden und $1{,}5 * 10^{-3}$ Todesopfern/a infolge von Gefahrgutunfällen zusammensetzt [ORA 2016]. Der zugehörige Akzeptanzwert von 0,184 Todesopfern/a wird damit unterschritten.

Die Ansätze im deutschen Verfahren gehen von höheren Betroffenenzahlen aus, so dass die jeweiligen Schadenerwartungswerte über denen des dänischen Verfahrens liegen. Dies wird besonders bei dem Schadenserwartungswert bei Brandursachen deutlich. Im Einzelnen ergeben sich Schadenserwartungswerte von 0,309 Todesopfern/a infolge von Unfällen und 0,0636 Todesopfer/a infolge von Brandursachen, insgesamt also 0,3725 Todesopfer/a.

Beide Ergebnisse, sowohl nach dem dänischen als auch nach dem deutschen Berechnungsverfahren liegen deutlich unter den jeweiligen zu betrachtenden Grenzwerten. Die ermittelten Schadenserwartungswerte liegen etwa 15-20 % unter den Vergleichswerten. Beide Risikoanalysen weisen nach, dass die geplante Ausführung des Fehmarnbelttunnels die dänischen und deutschen Sicherheitsanforderungen sowie auch die Sicherheitsanforderungen der Europäischen Tunnelrichtlinie erfüllen.

Literatur

[ADR 2015] Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, 1. Januar 2015

[ASMT 2006] Mayer, G. (2006): Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47

[BSDST 2005] Steinauer, B.; Mayer, G.; Brake, M.; Haack, A.; Schreyer, J. und Grünewald, M. (2005): Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 925, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

[EE ATS 2015] Bark, A., Kutschera, R., Resnikow, K. Baier, M., Schuckließ, W. (2015): Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 265, ISBN 978-3-95606-210-0

[F+P 2003] Mayer, G.; Baltzer W. (2003): Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Band 40, Bauverlag BV

[FE ADR 2009] Baltzer, W.; Imhof D.; Mayer, G.; Riepe , Zimmermann, U.; Zulauf, C.; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Hrsg.: Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007; Forschungsbericht zu FE 03.0437/2007/FRB und FE 86.0050/2008; 2009; digital veröffentlicht auf www.bast.de

[FE BVT 2006] Mayer, G.; Kündig, P.; Steinauer, B. (2006): Brandversuche in Tunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, FE 03.375/2004/FGB, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

[FE NA 2006] Baltzer, W.; Mayer, G.; Mühlberger, A.; Pauli, P.; Riepe, W.; Steinauer, B.; Zimmermann, U. (2006): Gestaltung von Notausgängen in Straßentunneln, FE 03.390/2005/FGB, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2006)

[FLUCHT 2004] Baltzer, W.; Barleon, M.; Becher, Th.; Mayer, G.; Riepe, W.; Steinauer, B. und Zimmermann, U. (2004): Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Systematik der Leitsysteme, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 892, BMVBW

[LUFT 2017] Wehner, W.; Thumm, S.; Fehmarnbelt Tunnel, Lüftung des Straßentunnels - Prüfung, Berichtsnummer 95-212-003, Stand: 30.01.2017; Version 4.0

[MAYER 2008] Mayer, G. (2008): Bestimmung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln mittels quantitativer Risikoanalysen, VDI Berichte 2019: Tunnel und andere unterirdische Verkehrsanlagen, Technische Ausstattung, Betrieb und Sicherheit, ISBN 978-3-18-092019-1

[MTFVTP 1995] MTFVTP (1995): Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration

[ORA 2016] Feste Fehmarnbeltquerung - Betriebsrisikoanalyse (ORA), 8. Überarbeitung; Betriebsrisikoanalyse; Pedersen, Sørensen, Sunde, Glibbery; Nr. RAT 64233-002, ATR RAT75-KSA-569; Stand: 03.06.2016

[PFU RQ 2016] Feste Fehmarnbeltquerung – Planfeststellungsunterlage, Anlage 6.3, Blatt 1, Regelquerschnitte Eisenbahnstrecke und E 47 im Tunnel, Standardelement; Plan-Nr. RAT-N-X11-0631, Index 7, Stand: 03.06.2016

[QBRT 2006] Mayer, G.; Haastert J. (2006): Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43

[RABT 2006] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT Ausgabe 2006, Köln, 2006

[RABT 2016] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT Ausgabe 2016, Köln, Stand 16.11.2016

[SB FE 2009] Baltzer, W.; Kündig, P.; Locher, P.; Mayer, G.; Riepe, W.; Steinauer, B.; Zimmermann, U.; Zulauf, C.; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Hrsg.: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Schlussbericht und Anhänge, FE 03.378/2004/FRB; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen-Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 66, Bergisch Gladbach, 2009

[SOLIT² 2012] SOLIT² Konsortium; 2012; SOLIT² Safety of Life in Tunnels, Abschlussbericht, online unter www.solit.info

[TFATU 2007] Mayer, G.; Steinauer, B. (2007): Tunnel fires: Assessment of the tunnel users´ escape possibilities using numerical simulations of the smoke propagation, Transportation Research Board Meeting, 21.-25.1.2007, Washington, D.C