

Josef-Deimer-Tunnel (Landshut) Quantitative Risikoanalyse



Auftraggeber

Stadt Landshut
Referat 5 Bauen und Umwelt – Tiefbauamt
Luitpoldstraße 29
84034 Landshut

14.05.2024

Kurztitel: Josef-Deimer Tunnel (Landshut) – Quantitative Risikoanalyse

Auftraggeber: Tiefbauamt Landshut

Vertrags-Nr.: 631-1-2022-001

Auftrags-Nr.: 17541

Bearbeitung:

BUNG

BUNG Ingenieure AG
Zweigniederlassung Stuttgart
König-Karl-Straße 43
D-70372 Stuttgart

Tel.: +49 711 / 490 667-00

infostuttgart@bung-ag.de

www.bung-gruppe.de

Autoren

Dr.-Ing. Georg Mayer
Zweigniederlassungsleiter Stuttgart
mayer.georg@bung-ag.de

Dipl.-Ing. (FH) Sven Brenberger
Projektleiter Infrastrukturmanagement
brenberger.sven@bung-ag.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Ausgangslage	6
2 Aufgabenstellung	7
3 Untersuchungsgrundlagen	7
3.1 Tunnelgeometrie und Verkehrsführung	7
3.2 Flucht- und Rettungswege	10
3.3 Tunnellüftung	10
3.4 Kommunikationseinrichtungen	12
3.5 Brandmeldeanlage	12
3.6 Tunnelbeleuchtung	12
3.7 Löscheinrichtungen.....	12
3.8 Entwässerungseinrichtungen	12
3.9 Tunnelsperranlage	13
3.10 Verkehrsaufkommen	13
3.11 Zusammenfassung der Tunnelparameter	14
4 Untersuchungsvarianten	15
4.1 Referenzunnel (Referenzfall)	15
4.2 Untersuchungstunnel (Untersuchungsfall / Nullfall)	15
4.3 Untersuchungstunnel (Planfall 1 mit verbesserter Branddetektion)	15
5 Untersuchungsszenarien	15
6 Risikoanalyse und -bewertung	19
6.1 Grundsätzlicher Ablauf einer Risikoanalyse	19
6.2 Häufigkeitsermittlung	19
6.2.1 Definition von auslösenden Ereignissen	20
6.2.2 Entwicklung eines Ereignisablaufes	20
6.2.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis	21
6.2.3.1 Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit	21
6.2.4 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf.....	23
6.2.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Kollision	23
6.2.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Brand	25
6.2.5 Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf	26
6.3 Berechnung der Schadensausmaße.....	26
6.3.1 Schadensausmaße infolge Kollision	27
6.3.2 Schadensausmaße infolge Brand	27
6.3.2.1 Ermittlung von Einwirkungen (Impacts).....	28
6.3.2.2 Ermittlung von Auswirkungen (consequences)	30
6.4 Risikoermittlung.....	32

6.5 Risikobewertung der Untersuchungsfälle35

7 Zusammenfassung und Fazit 37

Literaturverzeichnis 38

Anhang Untersuchungsfälle 40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtlageplan des Josef-Deimer-Tunnels (Plangrundlage: Openstreetmap)6

Abbildung 2: Schematisches Vorgehen zur Sicherheitsbewertung (Voranalyse)7

Abbildung 3: Übersicht Josef-Deimer-Tunnel (Quelle: Tiefbauamt Landshut)7

Abbildung 4: Regelquerschnitt Josef-Deimer-Tunnel (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)8

Abbildung 5: Tunnelquerschnitt im Bereich der Pannenbuchten (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)9

Abbildung 6: Höhenprofil mit Gradientenverlauf (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)9

Abbildung 7: Höhenprofil mit Gradientenverlauf10

Abbildung 8: Belüftung des Tunnels im Normalbetrieb (Quelle: Gesamtsicherheitskonzept)11

Abbildung 9: Belüftung des Tunnels im Brandfall (Quelle: Gesamtsicherheitskonzept)11

Abbildung 10: Lageplan mit gewählten Ereignisorten des Nullfalls16

Abbildung 11: Brandverlaufskurven17

Abbildung 12: Maßgebliche Verkehrszustände17

Abbildung 13: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse und Risikobewertung19

Abbildung 14: Beispiel für einen Ereignisbaum (Mayer, Baltzer 2003)20

Abbildung 15: Berechnete Rauchausbreitung im Referenztunnel gemäß EABT-80/100 bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)29

Abbildung 16: Berechnete Rauchausbreitung im Josef-Deimer-Tunnel (Untersuchungsfall) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)30

Abbildung 17: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Referenztunnel gemäß EABT-80/100 bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)31

Abbildung 18: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Josef-Deimer-Tunnel (Untersuchungsfall) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)31

Abbildung 19: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Josef-Deimer-Tunnel (Planfall mit verbesserter Detektion) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)32

Abbildung 20: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Referenzfall)33

Abbildung 21: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Untersuchungsfall Josef-Deimer-Tunnel)34

Abbildung 22: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Planfall 1 Josef-Deimer-Tunnel)34

Abbildung 23: HA-Diagramm der Gesamtrisiken von Referenz-, Null- und Planfall35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mittlere Verkehrsbelastungen	13
Tabelle 2:	Tunnelparameter des Josef-Deimer-Tunnels	14
Tabelle 3:	Häufigkeiten H_0 von Initialereignissen	21
Tabelle 4:	Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Referenzstunnel	22
Tabelle 5:	Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Untersuchungstunnel	23
Tabelle 6:	Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision	24
Tabelle 7:	Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes	26
Tabelle 8:	Schadensausmaße infolge Kollision	27
Tabelle 9:	Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten	36
Tabelle 10:	Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Referenzfall)	36
Tabelle 11:	Maßgebende Untersuchungsfälle	40
Tabelle 12:	Erforderliche CFD-Simulationen	40

1 Ausgangslage

Der Josef-Deimer-Tunnel ist ein innerstädtischer Tunnel in Landshut. Um eine Umfahrung der historischen Innenstadt von Landshut zu ermöglichen, wurde der 1.510 m lange Tunnel, zunächst als Hofbergtunnel, in der Zeit von 1994 bis 1999 erbaut, davon das Ingenieurbauwerk selbst zwischen 1995 und 1997. Seit 2007 trägt er den Namen Josef-Deimer-Tunnel zu Ehren des ehemaligen Oberbürgermeisters von Landshut.

Die Anbindung an das städtische Straßennetz erfolgt über LSA-gesteuerte Knoten. Während das Westportal über eine LSA unmittelbar an die Wittstraße (B15) angebunden ist, weist das Ostportal eine ca. 100 m lange Aufstellfläche bis zum nächsten LSA gesteuerten Knoten auf (siehe Abbildung 1).

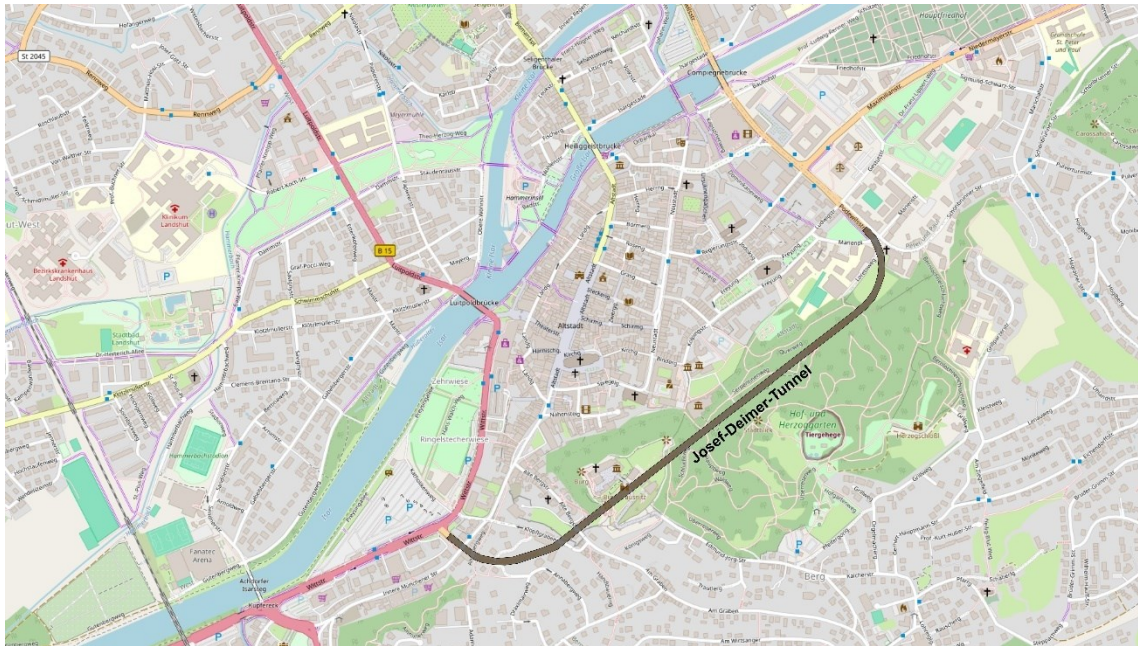


Abbildung 1: Übersichtslageplan des Josef-Deimer-Tunnels (Plangrundlage: Openstreetmap)

Aufgrund der 25-jährigen Betriebszeit des Tunnels sind einige der betriebs- und sicherheitstechnischen Komponenten in die Jahre gekommen. Andere Anlagenteile wurden bereits modernisiert, wie z.B. die Tunnelfunkanlage, die mittlerweile auf digitalen Funk (TETRA) umgerüstet ist. Eine detaillierte Bestandsaufnahme der bestehenden technischen Ausstattung mit Defizit-Matrix und Anlagenlaufzeiten ist als gesonderter Bericht verfügbar¹.

Einige bauliche Aspekte erfüllen aber nicht die Vorgaben der aktuellen Regelwerke. Dies betrifft beispielsweise die langen Notausgangsabstände oder die steilen Gradienten in den Portalbereichen. Zudem ist die betriebstechnische Ausstattung mit über 25 Betriebsjahren am Ende der Nutzbarkeit und muss im Rahmen einer grundlegenden Erneuerung der technischen Komponenten ausgetauscht und ergänzt werden, um einen sicheren Betrieb des Josef-Deimer-Tunnels zu gewährleisten.

Gemäß RE-ING 2023 (Anhang E) bzw. EABT-80/100 2019 (Kapitel 3.2) sind grundsätzlich Voranalysen zur Sicherheitsbewertung für Tunnel ab 400 m Länge auszuführen, um eine Grobbeurteilung vorzunehmen und die notwendige Analysetiefe festzulegen (siehe Abbildung 2).

¹BUNG Ingenieure AG: Josef-Deimer-Tunnel Landshut - Bestandsaufnahme der technischen Ausstattung

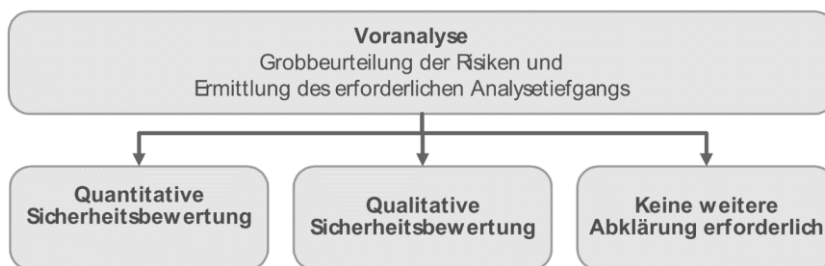


Abbildung 2: Schematisches Vorgehen zur Sicherheitsbewertung (Voranalyse)

Eine entsprechende interne Voruntersuchung hat gezeigt, dass für den Josef-Deimer-Tunnel eine quantitative Sicherheitsbewertung erforderlich ist. Die bereits existierende Risikoanalyse aus dem Jahr 2009² entspricht allerdings nicht mehr den Anforderungen und dem Stand der Technik hinsichtlich der Durchführung von Quantitativen Risikoanalysen. Aktuell soll gemäß den Vorgaben der Bundesanstalt für Straßenwesen das Heft B 183 zur Anwendung gebracht werden.

2 Aufgabenstellung

Für den Josef-Deimer-Tunnel ist eine quantitative Risikoanalyse für den Regelbetrieb zu erstellen. Ziel ist der Nachweis eines ausreichenden Sicherheitsniveaus gemäß den Mindestanforderungen der aktuellen Regelwerke RE-ING 2023 bzw. EABT-80/100 2019. Dabei sind ggf. sicherheitserhöhende Maßnahmen für den Nachweis eines ausreichenden Sicherheitsniveaus zu berücksichtigen.

3 Untersuchungsgrundlagen

3.1 Tunnelgeometrie und Verkehrsführung

Der Josef-Deimer-Tunnel ist ein einröhriger Tunnel, der als Gegenverkehrstunnel betrieben wird. Die Länge der Tunnelröhre einschließlich Überbauten an den Portalen beträgt 1.510 m. Je Fahrtrichtung verfügt der Tunnel über jeweils einen Fahrstreifen. Eine schematische Darstellung des Tunnels zeigt Abbildung 3.

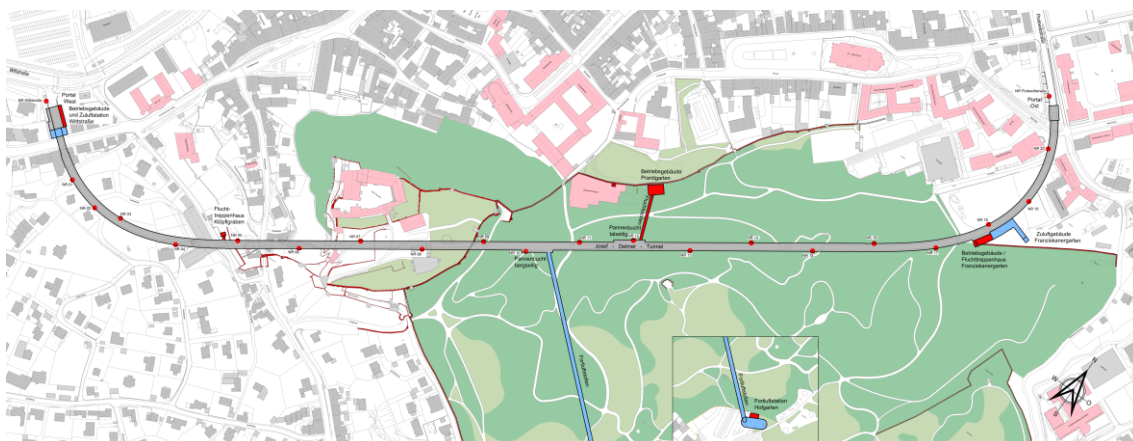


Abbildung 3: Übersicht Josef-Deimer-Tunnel (Quelle: Tiefbauamt Landshut)

² ZERNA Ingenieure GmbH: Risikoanalyse gemäß RABT 2006 für den Straßentunnel Josef-Deimer-Tunnel in Landshut (Stand Mai 2009)

Der Tunnel ist weitestgehend in bergmännischer Bauweise erstellt. Der Querschnitt der Tunnel ist als Sonderquerschnitt in Anlehnung an den Regelquerschnitt RQ 10,0 T der RABT 2006 ausgebildet. Je Fahrtrichtung und Röhre weist die Fahrbahn eine Gesamtbreite von 7,0 m auf. Seitenstreifen sind nicht vorhanden, stattdessen sind im Tunnel 2 Pannenbuchten angeordnet, die einen Abstand von > 600 m aufweisen und zueinander versetzt ausgeführt sind.

Die lichte Höhe über der Fahrbahnmitte beträgt etwa 5,10 m in den Röhren. Die Höhe des lichten Raumes liegt bei jeweils 4,50 m. Nachfolgende Abbildung 4 zeigt exemplarisch den realisierten Regelquerschnitt sowie Abbildung 5 den verbreiterten Querschnitt im Bereich der Pannenbuchen für die Tunnelabschnitte in bergmännischer Bauweise.

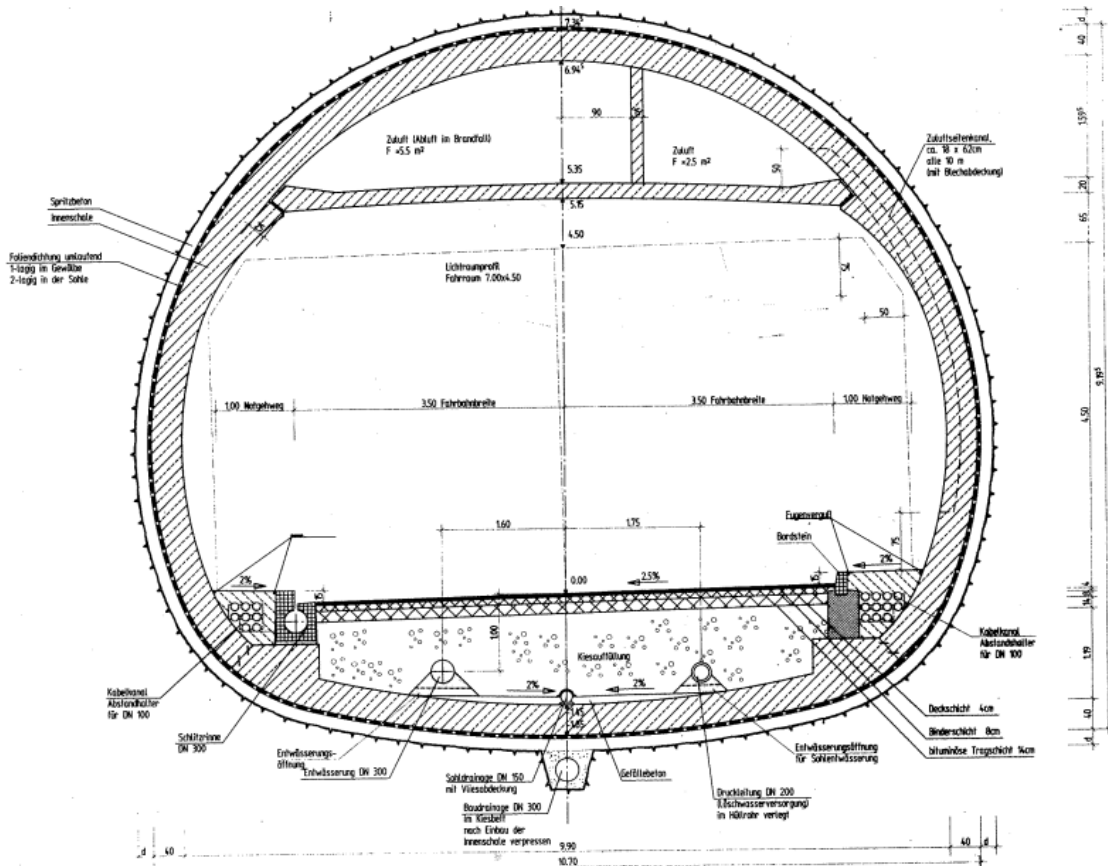


Abbildung 4: Regelquerschnitt Josef-Deimer-Tunnel (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)

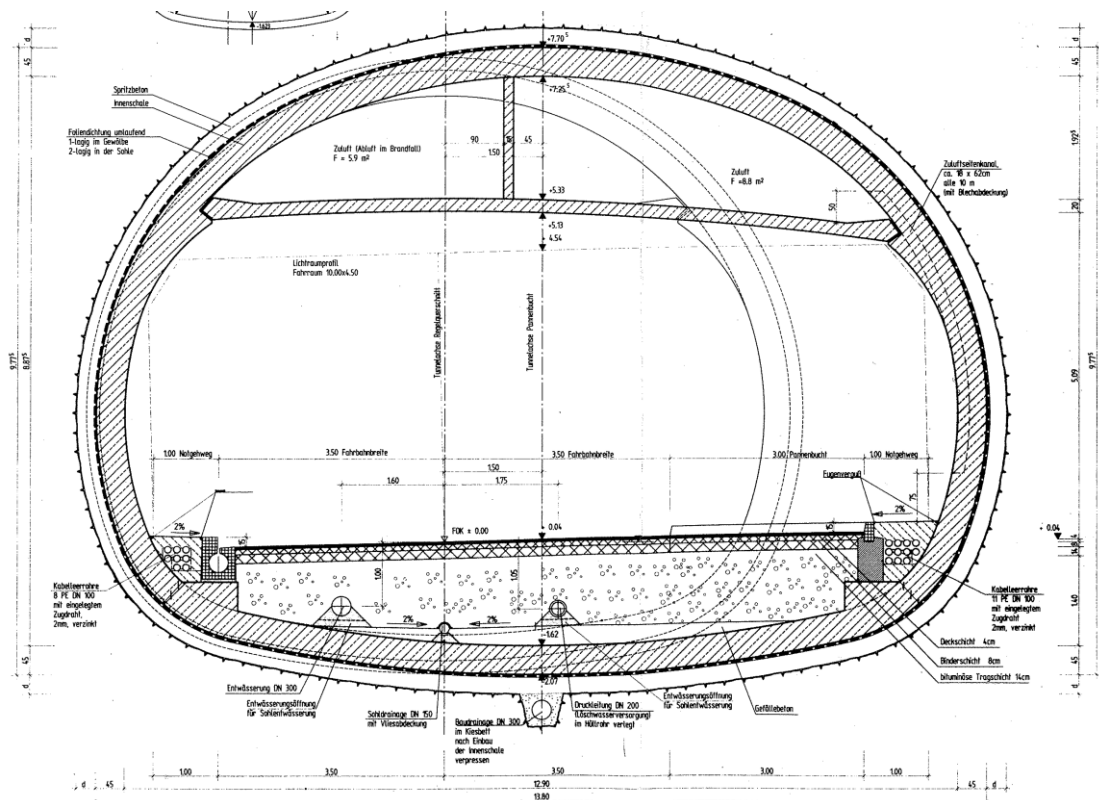


Abbildung 5: Tunnelquerschnitt im Bereich der Pannebuchten (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)

Die Längsneigung beträgt im Bereich des Portals Wittstraße maximal $\pm 6,0\%$. Sie liegt damit über den Vorgaben aus den EABT-80/100. In der weiteren Tunnelinnenstrecke liegen nur geringe Längsneigungen von maximal $\pm 0,9\%$ vor, bevor wieder im Bereich des Portals Podewilsstraße erhöhte Längsneigungswerte von bis zu $\pm 5\%$ feststellbar sind. Abbildung 6 zeigt den entsprechenden Gradientenverlauf innerhalb des Tunnels als Planausschnitt.

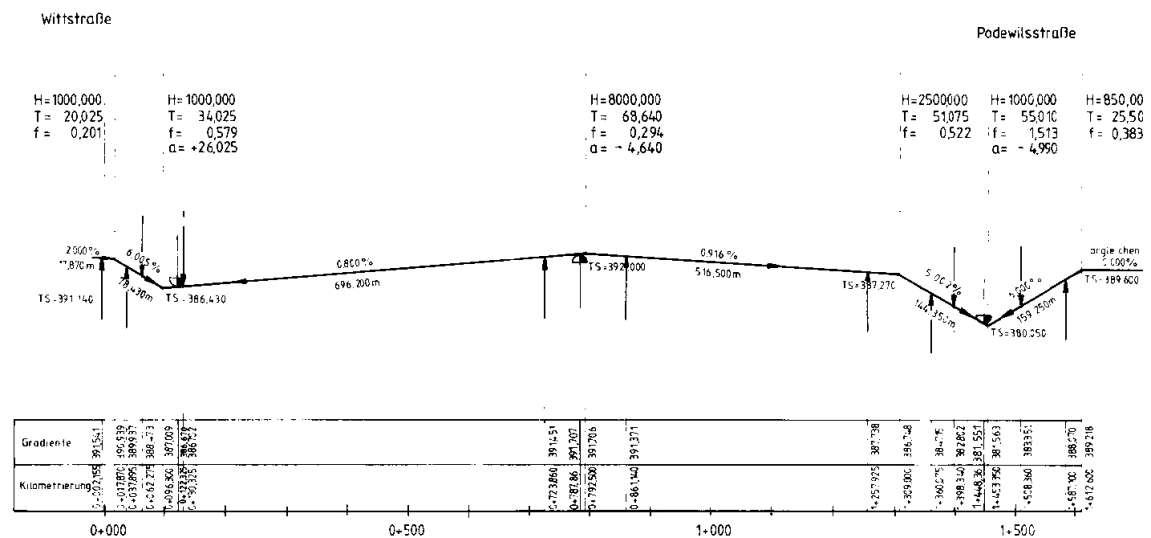


Abbildung 6: Höhenprofil mit Gradientenverlauf (Quelle: Stadt Landshut Tiefbauamt)

In Abbildung 7 ist der Gradientenverlauf mit zusätzlicher Darstellung der Notausgänge abgebildet

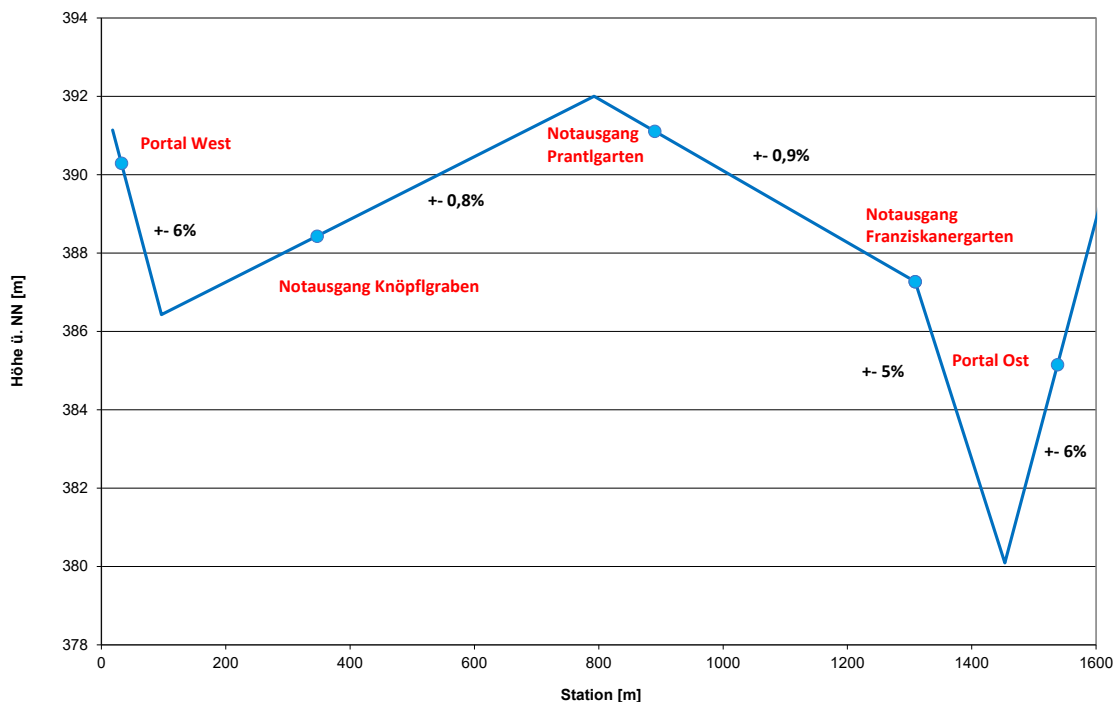


Abbildung 7: Höhenprofil mit Gradientenverlauf

3.2 Flucht- und Rettungswege

Als Fluchtweg- und Rettungswege dienen die beidseits der Fahrbahn vorhandenen Notgehwege mit einer Mindestbreite von $\geq 1,00$ m Breite, über welche die Tunnelportale sowie insgesamt 3 Notausgänge erreicht werden können. Sie führen über Notausgangstüren und angeschlossene Fluchttreppenhäuser bzw. einen Fluchtstollen ins Freie. Der maximale Notausgangsabstand beträgt 543 m, der mittlere Notausgangsabstand liegt bei etwa 378 m.

Zusätzlich sind an der Tunnelwand Fluchtwegkennzeichen installiert, die aus einem Fluchtwegsymbol und Pfeilsymbolen je Fluchtrichtung mit darüber angeordneten Entfernungsangaben zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bestehen.

3.3 Tunnellüftung

Der Josef-Deimer-Tunnel verfügt über eine mechanische Halbquer-Quer-Lüftung. Die Ventilation ist auf eine Bemessungsbrandleistung von 30 MW ausgelegt. Die Tunnelröhre ist in 10 Brandabschnitte unterteilt, Abbildung 8 zeigt das Lüftungsschema im Normalbetrieb, in Abbildung 9 ist exemplarisch die Belüftung im Brandfall beschrieben. Ausführliche Informationen zur Ventilation sind beispielsweise im Bericht zur „Überprüfung der Lüftungstechnischen Anlage“ enthalten³. Sie bilden die Grundlage für die Lüftungstechnische Modellierung des Tunnels im Rahmen der Risikoanalyse.

³ HBI: Josef-Deimer-Tunnel in Landshut- Überprüfung der Lüftungstechnischen Anlagen (Stand 29.04.2022)

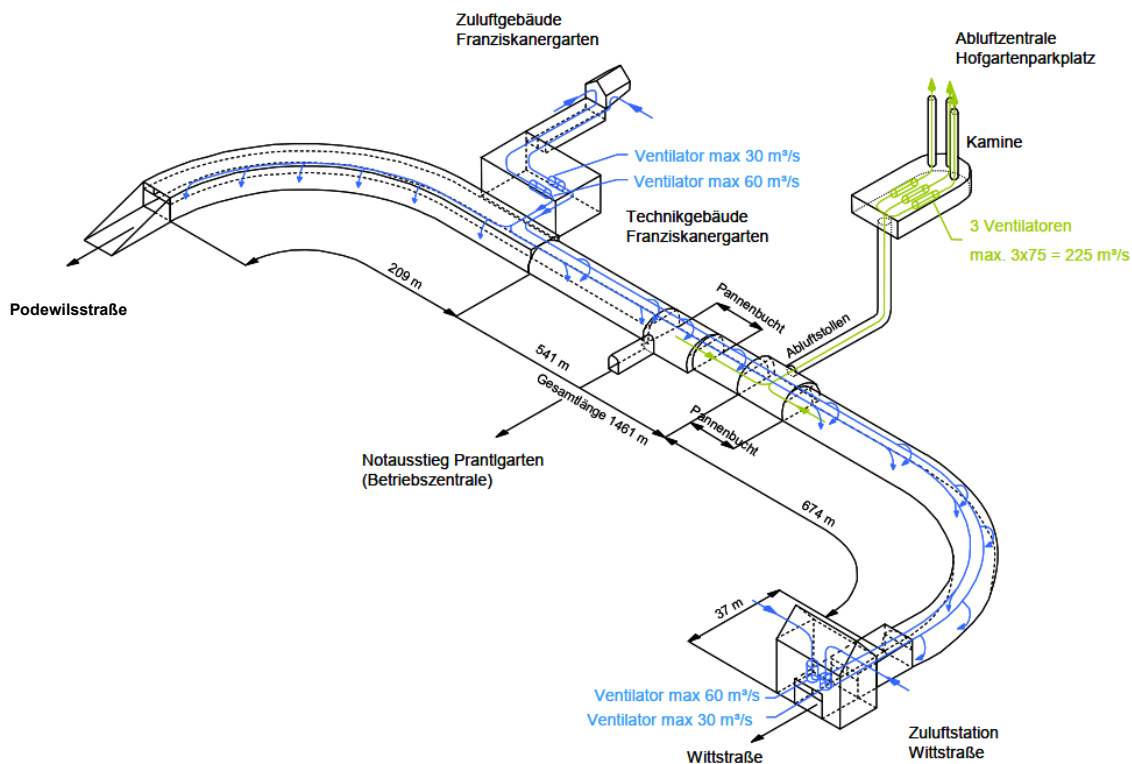


Abbildung 8: Belüftung des Tunnels im Normalbetrieb (Quelle: Gesamtsicherheitskonzept)

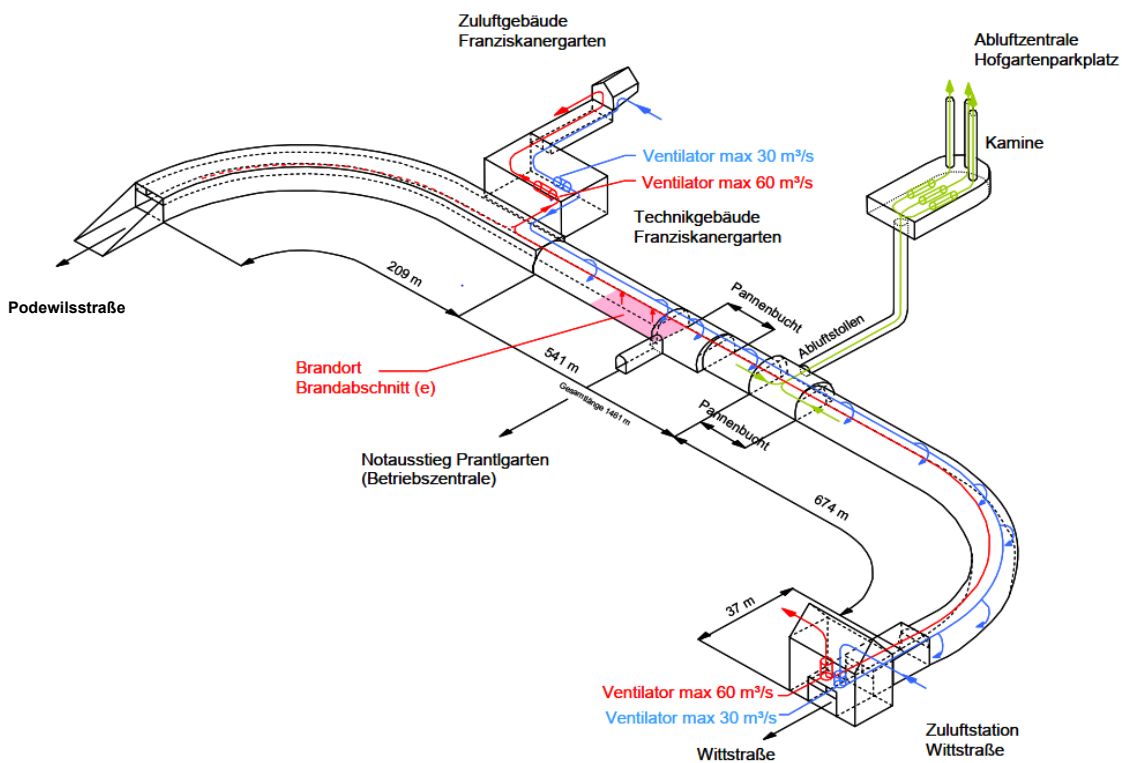


Abbildung 9: Belüftung des Tunnels im Brandfall (Quelle: Gesamtsicherheitskonzept)

Im Normalbetrieb wird 2/3 der Zuluft über Öffnungen an der Tunneldecke, die im Abstand von etwa 40 m angeordnet sind, in den Fahrraum eingeblassen. Zusätzlich sind seitlich an der Tunnelwand Öffnungen etwa

1,2 m über der Fahrbahn angebracht, über die quer zur Fahrtrichtung Frischluft zugeführt werden kann. Sie sind in einem regelmäßigen Abstand von etwa 10 m installiert.

Im Brandfall wird zunächst der Brandort lokalisiert und dann im betreffenden Brandabschnitt lokal über die an der Tunneldecke angebrachten Klappen Luft bzw. Rauch aus dem Tunnel abgesaugt.

3.4 Kommunikationseinrichtungen

Die Überwachung des Tunnels erfolgt über eine ständig besetzte Stelle, die in der Betriebszentrale des Kraftwerks Maxwehr der Stadtwerke Landshut angesiedelt ist. Zur Kommunikation zwischen Tunnelnutzern und der Tunnelzentrale sind innerhalb des Tunnels 20 Notrufsprechstellen in den Notrufnischen an den Tunnelwänden angeordnet. Sie sind in einem Abstand von jeweils etwa 80 m alternierend an der Tunnelwand installiert. Diese sind aus Gründen einer besseren Verständlichkeit als begehbare Kabinen gestaltet. Zusätzliche Sprechstellen sind an den Portalen vorhanden. Die Notrufe laufen in der Polizeieinsatzzentrale Niederbayern (Straubing) auf.

Zur visuellen Überwachung des Tunnels in der Tunnelzentrale sind im Tunnel in regelmäßigen Abstand Videokameras installiert, die bislang aber keine durchgängige Überwachung des gesamten Tunnelbereiches zulassen. Eine Verdichtung der Kamerastandorte ist im Rahmen der Sanierung vorzusehen. Die Richtlinien nennen dabei als Anforderung eine lückenlose Überwachung und einen Höchstabstand von 75 m. Eine direkte Einsprechmöglichkeit oder vorgefertigte Textbausteine zur Übertragung von Anweisungen an die Tunnelnutzer über Lautsprecher sind bislang nicht vorhanden und sind daher nachzurüsten. Die bestehenden Lautsprecher werden zur besseren Verständlichkeit im Rahmen der Sanierung erneuert und sollen als Grenzflächenhörner ausgeführt werden. Zusätzliche Lautsprecher im Bereich der Tunnelportale, der Rettungswege sowie den Betriebsgebäuden sind nicht vorhanden. Radiotransmissionen über UKW-Radio sind aber möglich.

3.5 Brandmeldeanlage

Zur automatischen Detektion von Bränden sind Linienbrandmelder (Temperaturmessung) im Bereich der Tunneldecke installiert. Über das Ansprechen der Linienbrandmelder findet eine Lokalisierung des Brandortes sowie das Auslösen eines Brandalarms statt. Auch die manuellen Brandmeldeeinrichtungen (Druckknopfmelder in den Notrufkabinen sowie an den Portalen) lösen einen Brandalarm aus.

3.6 Tunnelbeleuchtung

Die Tunnelbeleuchtung im Josef-Deimer-Tunnel ist auf Gegenverkehrsbetrieb ausgelegt. Das betrifft beispielsweise die Nachtbeleuchtung, die im Gegenverkehr höher als im Richtungsverkehr auszulegen ist.

3.7 Löscheinrichtungen

Im Hinblick auf die zur Durchführung von Brandbekämpfungsmaßnahmen bereitzustellenden Einrichtungen ist zwischen Löscheinrichtungen für die Tunnelnutzer und Löscheinrichtungen der Feuerwehr zu unterscheiden.

Im Tunnel sind zur Löschwasserversorgung der Feuerwehr Entnahmestellen neben den Notrufnischen in der Tunnelwand installiert. Sie sind regelmäßig im Tunnel in einem Abstand < 80 m angeordnet. Handfeuerlöcher für Tunnelnutzer sind in den Notrufkabinen vorhanden.

3.8 Entwässerungseinrichtungen

Zur Sammlung und Ableitung von Flüssigkeiten wie Schleppwasser aber auch bei Freisetzungen von flüssigen Gefahrstoffen (z. B. bei einem Tankwagenunfall) ist am tieferliegenden Fahrbahnrand eine Schlitzrinne angeordnet. Die weitere Entwässerung erfolgt über je ein Rückhaltebecken an den Portalen mit einem Stauvolumen von $2 \times 40 \text{ m}^3$.

3.9 Tunnelsperranlage

Der Tunnel verfügt über eine Sperranlage, bestehend aus Wechsellichtzeichen (WLZ) rot/gelb direkt an den Portalen sowie vorgelagerten Sperrschranken, die im Ereignisfall Verkehrsteilnehmer an der weiteren Einfahrt in den Tunnel hindern.

3.10 Verkehrsaufkommen

Auf Grundlage der Angaben des Tiefbauamtes Landshut wurde für den Josef-Deimer-Tunnel ein durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTV_w) von ca. 18.350 Kfz/24h angenommen. Der Schwerverkehrsanteil (SV) ist mit nur ca. 4 % sehr gering. Der Tunnel ist Bestandteil der städtischen Buslinien und wird zusätzlich durch Schulbusse befahren. Daher wird angenommen, dass mit 25% ein Großteil des Schwerverkehrs durch Busse repräsentiert wird. Die zulässige Geschwindigkeit im Tunnel beträgt 50 km/h.

Eine Zusammenstellung der für die Risikoanalyse zu Grunde gelegten Verkehrswerte enthält nachfolgende Tabelle 1. Die Verteilung in Tag- und Nachtverkehr wurde dabei auf Basis der RLS-19⁴ mit einem Verhältnis von ca. 92 % zu 8% berücksichtigt. Es wird auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass für den Tunnel aufgrund der vorgelagerten Lichtsignalanlagen im Bereich der Tunnelportale werktags (Montag bis Freitag) mit bis zu zwei Stunden Stau täglich gerechnet werden muss. Das überschreitet deutlich die Grundannahmen von 50 h Stau pro Jahr gemäß EABT-80/100.

Verkehrsdaten Josef-Deimer-Tunnel		
DTV _w	Gesamt 0-24 Uhr [Kfz/d]	18.350
	Tagverkehr 6-22 Uhr [Kfz/16h]	16.882
	Nachtverkehr [Kfz/8h]	1.468
Schwerverkehrsaufkommen (SV)	Gesamt 0-24 Uhr [Lkw/d]	734
Lkw-Anteil	Gesamt 0-24 Uhr	4,0 %
	Taganteil 6-22 Uhr	4,0 %
	Nachtanteil 22-6 Uhr	4,0 %

Tabelle 1: Mittlere Verkehrsbelastungen

⁴ FGSV: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19), Ausgabe 2019

3.11 Zusammenfassung der Tunnelparameter

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die wesentlichen Eckdaten zusammengefasst.

Tunnelparameter	
Verkehrsart	Gegenverkehrstunnel mit 1 Röhre
Anzahl Fahrstreifen je Röhre	1 Hauptfahrstreifen pro Fahrtrichtung
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	50 km/h
Tunnellänge	1.510 m
Bauweise Bauwerk	Vorwiegend Bergmännische Bauweise
Tunnelquerschnitt lichte Bauhöhe / Lichtraumprofil lichte Weite	Sonderquerschnitt (in Anlehnung an RQ 10,0 T der RABT 2006) ca. 5,10 m / 4,50 m ≥ 9,00 m
Längsneigung	In den Portalbereichen bis zu ± 6 %
Lüftungssystem	Halbquer-Querlüftung
Bemessungsbrandleistung	30 MW ⁵
Entwässerung	Die Entwässerung der Fahrbahn erfolgt über Schlitzrinnen am jeweils tieferliegenden Fahrbahnrand.
Maximaler Notausgangsabstand	543 m
Kommunikationseinrichtungen	Lautsprecher, Notrufsprechstellen an den Tunnelportalen und innerhalb der Tunnelröhren, UKW-Funk, digitaler BOS-Funk
Überwachungseinrichtungen	Videoüberwachung, Brandmeldesystem
Tunnelsperranlage	WLZ am Tunnelportal, Schrankenanlage
Besonderheiten	-
Verkehrsdaten	
DTV (tägliches Verkehr)	18.350 Kfz/Tag
Schwerverkehrsanteil (SV)	4 %

Tabelle 2: Tunnelparameter des Josef-Deimer-Tunnels

⁵ Die Bemessungsbrandleistung repräsentiert die Brandleistung, auf die die Tunnelventilation auszulegen ist, unabhängig von den tatsächlich auftretenden Brandlasten während des Betriebs.

4 Untersuchungsvarianten

Bei den zu untersuchenden Varianten ist grundsätzlich zwischen dem Referenzfall sowie dem Untersuchungsfall zu unterscheiden.

4.1 Referenzunnel (Referenzfall)

Der Referenzunnel entspricht in seinen Ausstattungselementen und den baulichen Tunnelparametern (z.B. Fahrstreifenbreiten, Längsneigungen usw.) den Vorgaben der RE-ING 2023 bzw. EABT 80/100 als Gegenverkehrstunnel. Geometrische Grundlage dazu bildet der Untersuchungstunnel, er wird aber auf einen RQ 11 t gemäß EABT-80/100 aufgeweitet. Die Tunnellänge bleibt gleich, die Längsneigung wird aber auf ± 3 % begrenzt. Im Hinblick auf die Wahl des Lüftungssystems ist nach den RE-ING bzw. EABT-80/100 für einen Gegenverkehrstunnel ab 1.200 m Länge eine Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal zu wählen.

Die weitere Ausstattung entspricht den Mindestanforderungen der RE-ING bzw. EABT 80/100. Die Erkennung von Brandereignissen erfolgt dabei beispielsweise über linienhafte Wärmemelder. Die Regelwerke fordern dabei Detektionszeiten von 60 sec für einen 5 MW-Brand. Als Notausgangsabstand wird die Mindestforderung von ≤ 300 m berücksichtigt. Als Referenzgeschwindigkeit werden 50 km/h angesetzt. Die angenommene Verkehrsbelastung entspricht auch für den Referenzunnel den Ansätzen des Josef-Deimer-Tunnels.

4.2 Untersuchungstunnel (Untersuchungsfall / Nullfall)

Der Untersuchungstunnel (Untersuchungsfall / Nullfall) unterscheidet sich vom Referenzunnel in mehrfacher Hinsicht. Grundsätzlich wird der Josef-Deimer-Tunnel als Untersuchungstunnel in seinem derzeitigen bzw. beabsichtigten Betriebszustand nach der Sanierung abgebildet.

Hinsichtlich der Längsneigung weist der Tunnel im Bereich der Portale erhöhte Werte von bis zu 6,0 % auf, was zu einem verstärkten Backlayering⁶ führen kann. Der Notausgangsabstand mit maximalen Werten von 543 m liegt deutlich über den Mindestanforderungen der Richtlinien von maximal 300 m.

Der Josef-Deimer-Tunnel wird mit einer Geschwindigkeit von bis zu 50 km/h im Gegenverkehr betrieben. Die Fahrtrichtungstrennung erfolgt hier über eine weiße Doppellinie. Aufgrund des als RQ 10,0 T (gemäß RABT 2006) ausgeführten Tunnelquerschnitts, wird hier eine Fahrspurweite von 3,25 m berücksichtigt.

4.3 Untersuchungstunnel (Planfall 1 mit verbesserter Branddetektion)

Abweichend vom Untersuchungsfall / Nullfall wird die Detektionszeit von Brandereignissen reduziert. Es wird angenommen, dass Brände innerhalb von 40 sec erkannt werden können, dies kann beispielsweise über eine automatische Bildauswertung erfolgen, die über Rauchererkennung schon früh Brände erkennen kann. Die weiteren Parameter entsprechen dem Nullfall.

5 Untersuchungsszenarien

Für die Ermittlung des Sicherheitsniveaus im Josef-Deimer-Tunnel werden neben Unfällen auch schnell oder langsam ablaufende Brandereignisse betrachtet, die infolge von Unfällen bzw. technischen Defekten auftreten können. Die Folgen eines Brandes werden durch die Lage, den Ablauf und die Intensität eines

⁶ Das Strömen von heißen Brandgasen entgegen der Fahrtrichtung wird als Backlayering bezeichnet. Eine hohe negative Längsneigung führt bspw. zu einem erhöhten Kamineffekt zum höher gelegenen Portal und kann damit diesen unerwünschten Rückstrom verstärken. Der unerwünschte Effekt des Backlayerings soll durch eine bestehende Brandventilation reduziert oder verhindert werden.

Brandes sowie durch verkehrlich, bauliche, betriebstechnische und organisatorische Faktoren beeinflusst. Im Rahmen der Risiko- und Gefährdungsanalyse werden daher folgende Szenarien betrachtet:

Ereignisort

Durch die Lage des Ereignisortes können sich aufgrund geometrischer und verkehrlicher Randbedingungen sowie infolge betriebstechnischer Einrichtungen unterschiedliche Schadensausmaße ergeben. Im Fall des Josef-Deimer-Tunnels werden drei Brandorte jeweils im Bereich des nächstgelegenen Notausgangs untersucht (Abbildung 10). Im Bereich der Portale sind aufgrund des verstärkten Backlayerings im Brandfall erhöhte Schadensausmaße zu erwarten. Am Brandort in der Tunnelmitte treten verlängerte Fluchtwege bis zum nächstgelegenen Notausgang auf. Die Wahl der Brandorte stellt damit einen auf der sicheren Seite liegenden Ansatz dar.

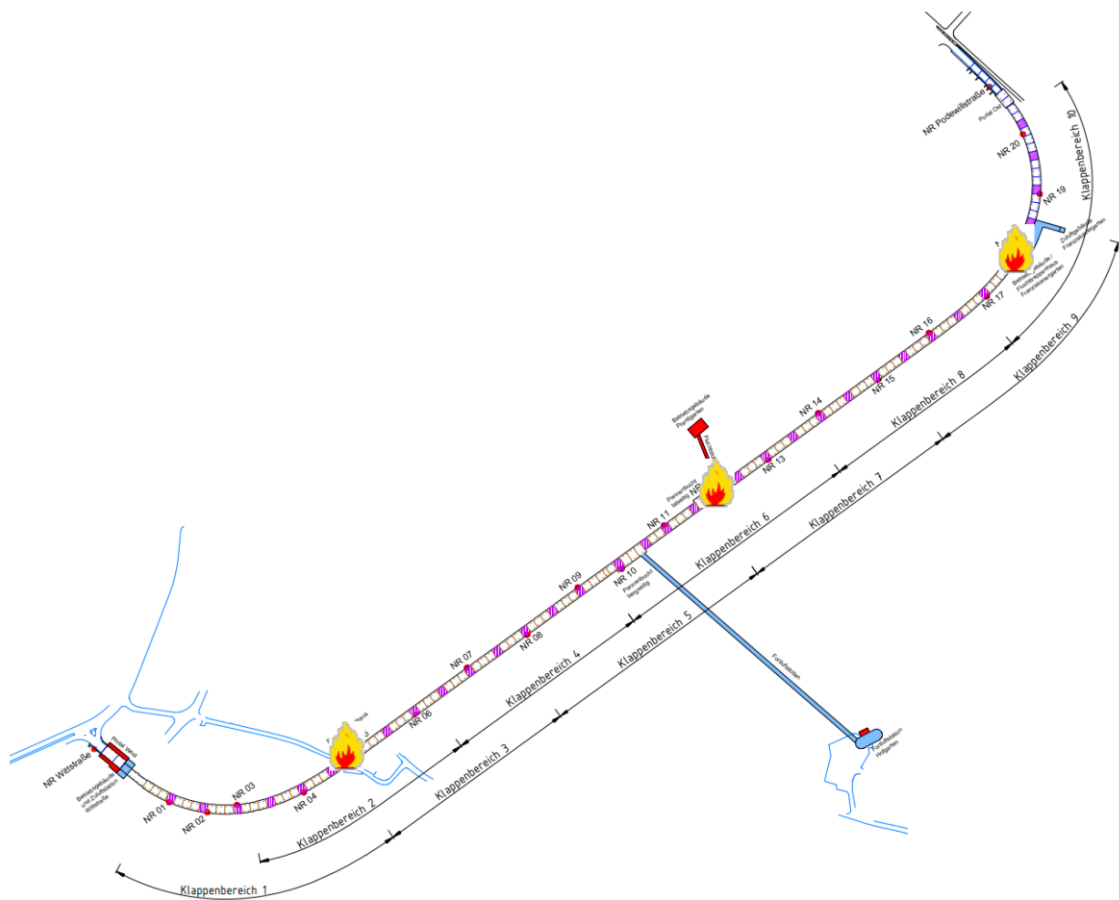


Abbildung 10: Lageplan mit gewählten Ereignisorten des Nullfalls

Brandentwicklung / -szenarien

Neben der maximalen Brandleistung hat auch die Brandentwicklung Einfluss auf die Betroffenenzahlen. Den Berechnungen wird bis zum Erreichen der fahrzeugspezifischen Brandleistung ein Brandverlauf gemäß den Vorgaben des Heftes B 183 in Anlehnung an die Bemessungsbrandkurve der ZTV-ING zugrunde gelegt.

Brände infolge von Unfällen können durch einen schnellen Brandverlauf gekennzeichnet sein, bei dem innerhalb von höchstens 2 Minuten die maximale Brandleistung erreicht ist. Dabei wird ein Anstieg von 0,833 MW/s berücksichtigt. Für langsam ablaufende Brände, wie sie z.B. bei Bränden aufgrund von technischen Defekten auftreten können, wird die Annahme getroffen, dass ihnen eine Phase von 5 Minuten voraus geht, in der zunächst die Brandleistung auf einem Niveau von 5 MW verharret, bevor sie auf ihren maximalen Wert ansteigt (siehe Abbildung 11).

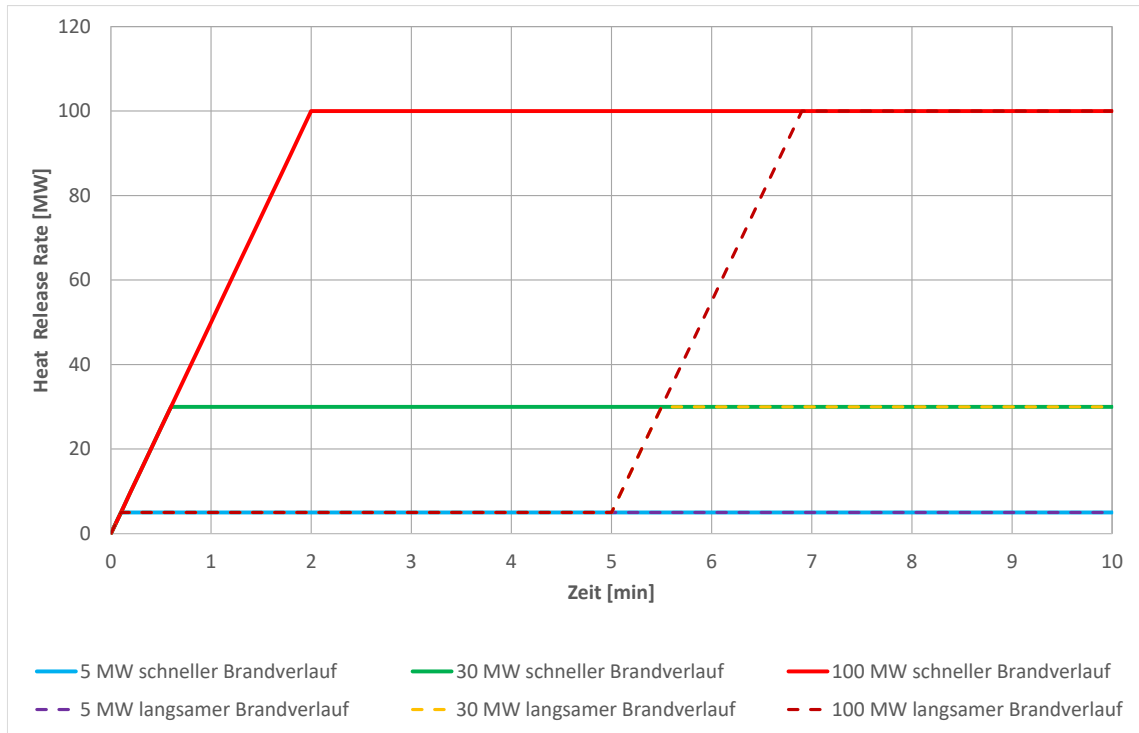


Abbildung 11: Brandverlaufskurven

Verkehrszustand

Erhebliche Auswirkungen auf die Rauchausbreitung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Schadensereignisses. Prinzipiell ist hierbei zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau zu unterscheiden.

Im Fall eines Schadensereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden sich die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge 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 Vollstaus, z. B. infolge von Unfallereignissen in den nachfolgenden Streckenabschnitten, oder im Fall eines Gegenverkehrsbetriebs, da sich in diesen Fällen beidseits des Ereignisortes Fahrzeuge befinden. In Abbildung 12 sind die maßgeblichen Verkehrszustände schematisch dargestellt.

Freier Verkehrsfluss (im Gegenverkehrsbetrieb)



Stausituation (im Gegenverkehrsbetrieb)

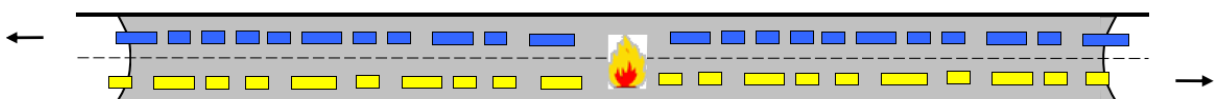


Abbildung 12: Maßgebliche Verkehrszustände

Verkehrsaufkommen

In Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens variiert die Anzahl an potenziell betroffenen Personen während eines Brandereignisses. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichem Verkehrsaufkommen wird zwischen Situationen bei Tag (hohe Verkehrsbelastung) und Nacht (geringere Verkehrsbelastung) unterschieden. Es wird davon ausgegangen, dass ca. 92 % des Gesamtverkehrs im Tagverkehr zwischen 6:00 und 22:00 Uhr auftreten. Die verbleibenden 8 % werden dem Nachtverkehr zugeordnet.

Detektion und Alarmierung

Das Erkennen und Melden eines Ereignisses (Detektion) mit einer anschließenden Alarmierung der Tunnelnutzer hat einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß. Unterschieden wird hierbei zwischen einer Detektion innerhalb von 60 sec, wie sie in den EABT-80/100 gefordert wird, und keiner Detektion. Im Fall einer Detektion wird davon ausgegangen, dass gleichzeitig eine Alarmierung der Tunnelnutzer stattfindet.

Neben automatischen Systemen zur direkten Branderkennung stehen auch manuelle Brandmeldeeinrichtungen (Notruf, Betätigung Handfeuermelder) zur Verfügung, über die Tunnelnutzer einen Brand melden können.

Ansonsten flüchten Personen beim Erkennen einer Gefahr selbsttätig.

Sperreinrichtung

Durch eine Sperreinrichtung kann verhindert werden, dass nach der Detektion eines Schadensereignisses noch mehr Fahrzeuge in den Tunnel einfahren und weitere Personen zusätzlich gefährdet werden. Es wird davon ausgegangen, dass im GV-Betrieb Sperreinrichtung an beiden Portalen vorhanden sind und zusammen mit der Detektion eines Brandes aktiviert werden.

Lüftung

Mit Hilfe von mechanischen Lüftungssystemen kann im Fall von Bränden das Schadensausmaß positiv beeinflusst werden. Daher ist das Aktivieren der Lüftungsanlage in den Untersuchungsszenarien mit zu berücksichtigen.

Erhöhte Schadensausmaße

Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, mit in ein Ereignis involviert sind. Ist dies der Fall, kann dies zu einer deutlichen Vergrößerung des Schadensausmaßes führen. Daher ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen.

Fremdrettung

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Die Auswirkung auf das Schadensausmaß wird über die Eintreffwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Eintreffzeit berücksichtigt. In der Risikoanalyse werden insgesamt 5 Zeitintervalle differenziert.

6 Risikoanalyse und -bewertung

6.1 Grundsätzlicher Ablauf einer Risikoanalyse

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

$$\text{Risiko} = \text{Häufigkeit des Eintritts} \cdot \text{Schadensausmaß}$$

Der prinzipielle Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse ist in Abbildung 13 dargestellt. Die einzelnen Verfahrensschritte und Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung werden nachfolgend kurz erläutert.

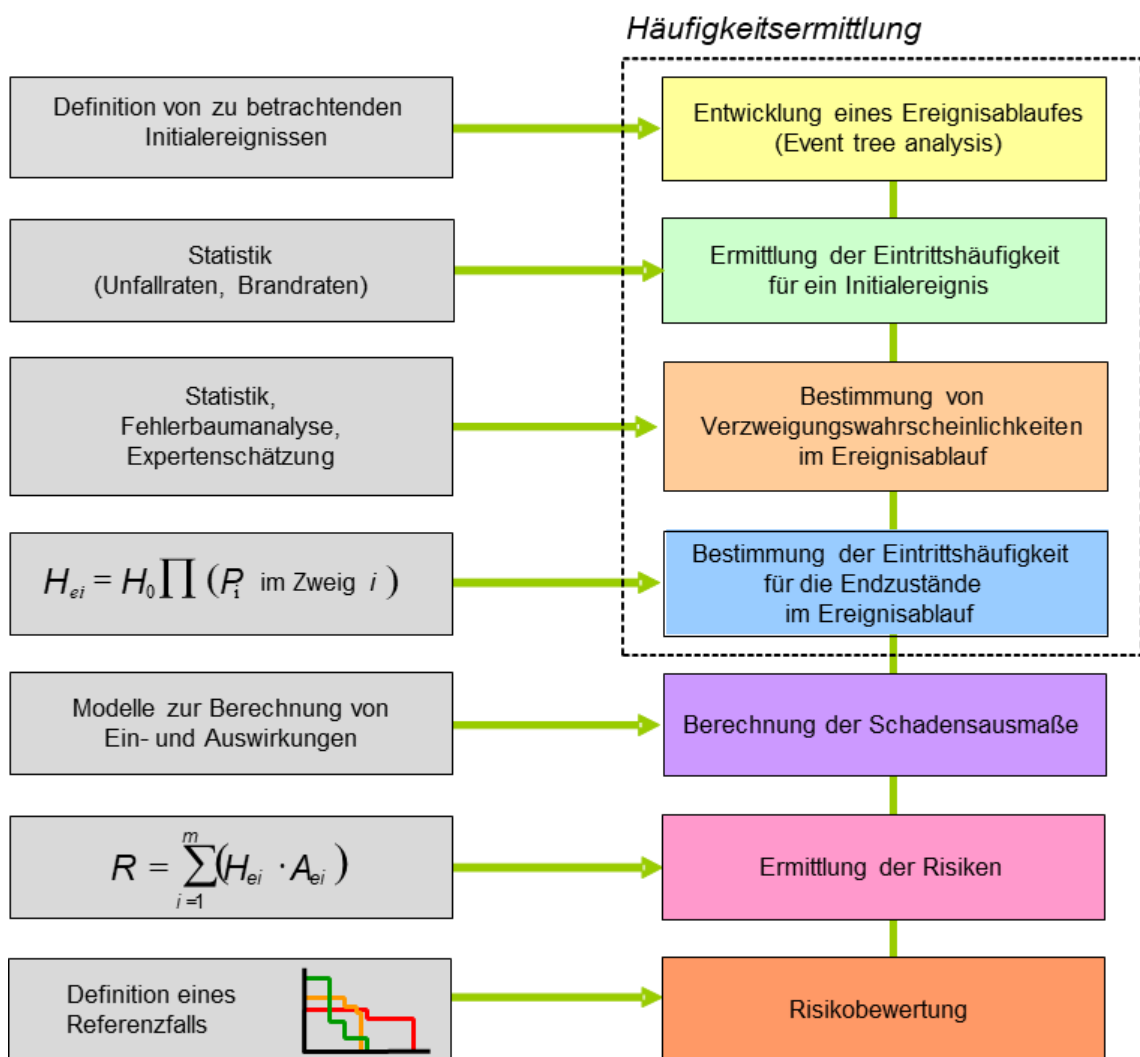


Abbildung 13: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse und Risikobewertung

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

Entsprechend den im Heft B 183 getroffenen Festlegungen zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln mittels quantitativer Risikoanalysen werden folgende auslösende Ereignisse (Initialereignisse) zugrunde gelegt:

- Unfall
- Unfall mit Brandwirkung
- Brand infolge technischen Defekts (Selbstzündung)

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, an dem 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 14 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

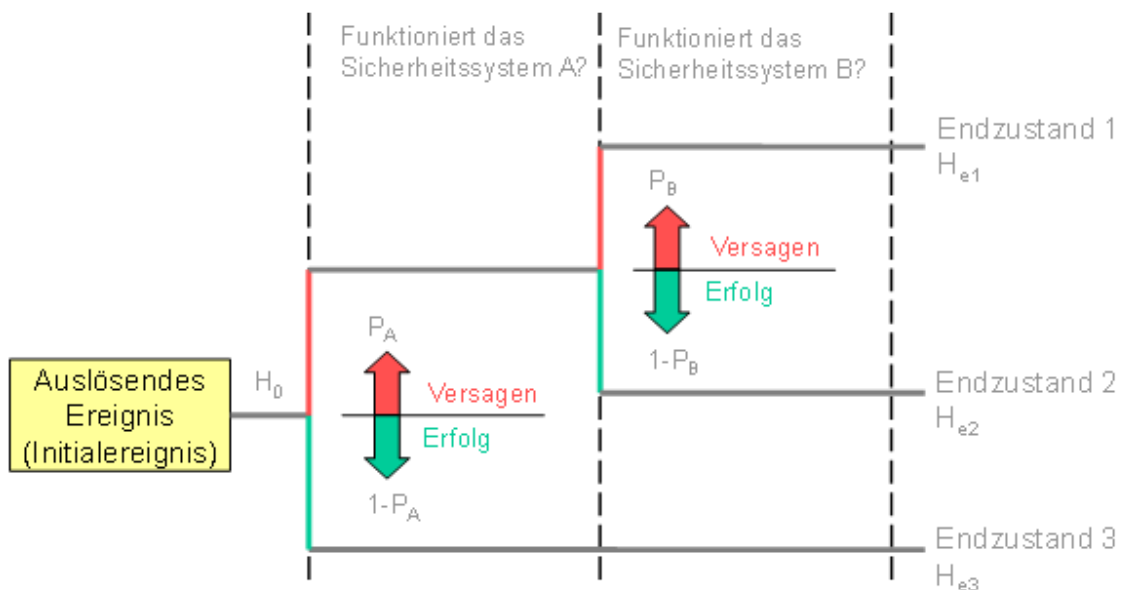


Abbildung 14: Beispiel für einen Ereignisbaum (Mayer, Baltzer 2003)

Wesentliche Verzweigungspunkte im Ereignisablauf sind beispielsweise:

- Ereignisort (z. B. Mittelpunkt, Einfahrtsbereich etc.)
- Brandlast (5 / 30 / 100 MW)
- Brandentwicklung (schnell / langsam)
- Verkehrsaufkommen (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr / Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion (ja / nein)
- Sperreinrichtung aktiviert (ja / nein)

- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja / nein), sofern vorhanden
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Beginn der Fremdrettung.

Nicht alle Verzweigungspunkte sind notwendigerweise in allen Betrachtungen vorhanden.

Je Untersuchungsfall ergeben sich abhängig von den zu berücksichtigenden Verzweigungspunkten somit bis zu 11.520 Endzustände bzw. Szenarien. Eine Zusammenstellung sämtlicher Untersuchungsszenarien enthält Tabelle 11 im Anhang. Für die Untersuchung werden insgesamt 72 CFD-Simulationen je Untersuchungsfall als Grundlage für die vorliegende Risikoanalyse erforderlich. Eine Herleitung und Zusammenstellung der für die Untersuchung maßgeblichen CFD-Simulationen enthält Tabelle 12 im Anhang des Berichtes. Die Anzahl der Endzustände sowie der notwendigen CFD-Simulationen ergibt sich dabei durch die zeilenweise Multiplikation der Anzahl an Entscheidungspunkten.

6.2.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis

Die Methode der Ereignisablaufanalyse erfordert nach der Identifizierung der auslösenden Ereignisse die Bestimmung der zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Um eine differenzierte Betrachtung des resultierenden Sicherheitsniveaus in Abhängigkeit von maßgeblichen Ereignisursachen zu ermöglichen, wird im Folgenden zwischen den Initialereignissen Kollision, Brand infolge Kollision sowie Brand infolge Selbstzündung unterschieden. Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben. In nachfolgender Tabelle 3 sind die Eintrittshäufigkeiten für das jeweilige Initialereignis zusammengefasst.

Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.1]	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	Beim Initialereignis Kollision handelt es sich um die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls. Es wird für den Referenz- bzw. Untersuchungstunnel eine Basisunfallrate von $1,00E-07$ [1/Fzg*km] pro Jahr angenommen, die dem Grundwert für Gegenverkehrstunnel entspricht. Der Grundwert ist mit den weiteren individuellen Einflussfaktoren anzupassen (siehe Kapitel 6.2.3.1).
Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den in Heft B183 verifizierten Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Danach wird angenommen, dass in 0,3 % der Unfälle mit einem sich daraus entwickelnden Kfz-Brand zu rechnen ist.
Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Brandrate beträgt von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1 / Fahrzeug*km].

Tabelle 3: Häufigkeiten H_0 von Initialereignissen

6.2.3.1 Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit

Die in Tabelle 3 dargestellte Basis-Unfallrate stellt zunächst nur einen statistischen Mittelwert anhand von Unfallauswertungen von deutschen Straßentunneln dar. Sie trennt zunächst nur in Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb als generelles Unterscheidungsmerkmal. Detailliertere Auswertungen haben gezeigt, dass darüber hinaus weitere Einflussfaktoren vorhanden sind. Sie sind zusätzlich für den jeweiligen Tunnel zu bestimmen und führen zu einer individuellen Unfallhäufigkeit für den betrachteten Tunnel. Dies gilt umso mehr für die Differenzierung von Referenz- und Untersuchungstunnel, die sich in den einzelnen Parametern deutlich unterscheiden können.

Das Verfahren gemäß Heft B 183 sieht vor, Einflüsse auf das Unfallgeschehen in Tunneln über Korrekturfaktoren zu bewerten und damit die Unfallhäufigkeit H_u zu bestimmen. Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände im Ereignisablauf werden über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$H_U = \frac{UR \cdot DTV \cdot L \cdot 365}{10^6} \cdot f_{ZA} \cdot f_L \cdot f_{FS} \cdot f_{FSB} \cdot f_{SS} \cdot f_{DTV/FS} \cdot f_v \cdot f_{\Delta v}$$

mit:

- UR Basis-Unfallrate [Unfälle pro 10⁶ Fzg-km]
- DTV Durchschnittliches, tägliches Verkehrsaufkommen [Kfz/24 h]
- L Tunnellänge [km]

Die dabei zu berücksichtigenden Einflussfaktoren sind

- f_{ZA} Vorhandensein von Zu- / Abfahrten
- f_L Tunnellänge
- f_{FS} Fahrstreifenanzahl
- f_{FSB} Fahrstreifenbreite
- f_{SS} Seitenstreifen
- f_{DTV/FS} Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen
- f_v Zulässige Geschwindigkeit
- f_{Δv} Differenzgeschwindigkeit

Referenz tunnel

Tabelle 4 zeigt die für den Referenz tunnel ermittelten Korrekturfaktoren. Die Länge des Josef-Deimer-Tunnels liegt bei 1.510 m und führt damit zu einem Längenkorrekturfaktor von 0,40. Die weiteren Parameter außer der Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen sowie die zul. Geschwindigkeit entsprechen den jeweiligen Grundwerten, so dass hier der Korrekturfaktor von jeweils 1 gilt.

Parameter	Bewertung Referenz tunnel	Korrekturfaktor Referenz tunnel
f _{ZA}	Keine Zu-/ Abfahrten vorhanden	1,00
f _L	Tunnellänge (1,51 km)	0,40
f _{FS}	1 Fahrstreifen je Fahrtrichtung	1,00
f _{FSB}	FS-Breite ≥ 3,50 m (beide Fahrstreifen)	1,00
f _{SS}	Kein Seitenstreifen vorhanden	1,00
f _{DTV/FS}	DTV pro Fahrstreifen = 6.550 Kfz/d	1,05
f _v	50 km/h (zulässige Geschwindigkeit)	0,63
f _{Δv}	Abschnittsweise Ermittlung in Abhängigkeit von Längsneigung und Geschwindigkeiten von Pkws und Lkws	1,00
f _{gesamt}	Korrekturgesamtfaktor	0,265

Tabelle 4: Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Referenz tunnel

In Summe führt dies zu einem Korrekturgesamtfaktor von 0,265. Das bedeutet, dass die Basisunfallrate um etwa 73 % reduziert werden kann. Die korrigierte Unfallrate des Referenz tunnels liegt damit bei 0,265E- 07 [1/Fzg*km].

Untersuchungstunnel

Auch für den Josef-Deimer-Tunnel als Untersuchungsfall lassen sich die Korrekturfaktoren bestimmen. Bis auf die eingeschränkte Fahrstreifenbreite entsprechen die Werte für den Josef-Deimer-Tunnel den Werten des Referenz隧nells unterscheidet (siehe Tabelle 5).

Parameter	Bewertung Untersuchungstunnel	Korrekturfaktor Nullfall
f_{ZA}	Keine Zu-/ Abfahrten vorhanden	1,00
f_L	Tunnellänge (1,51 km)	0,40
f_{FS}	1 Fahrstreifen je Fahrtrichtung (im GV-Betrieb)	1,00
f_{FSB}	1 x FS-Breite $\geq 3,25$ m	1,17
f_{SS}	Kein Seitenstreifen vorhanden	1,00
$f_{DTV/FS}$	DTV pro Fahrstreifen = 6.550 Kfz/d	1,05
f_v	50 km/h (zulässige Geschwindigkeit)	0,63
$f_{\Delta v}$	Abschnittsweise Ermittlung in Abhängigkeit von Längsneigung und Geschwindigkeiten von Pkws und Lkws	1,00
f_{gesamt}	Korrekturgesamtfaktor	0,310

Tabelle 5: Ermittlung der Korrekturfaktoren für den Untersuchungstunnel

Die korrigierte Unfallrate des Josef-Deimer-Tunnells liegt somit bei $0,310E-07$ [$1/Fzg \cdot km$]. Das bedeutet, dass im Vergleich zum Referenzfall eine um 17% erhöhte Unfallrate zu erwarten ist.

6.2.4 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf

Die Quantifizierung der Häufigkeiten der Endzustände erfordert Kenntnis über die Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf. Zu unterscheiden ist hierbei prinzipiell zwischen den Ereignisabläufen infolge Brand und Kollision als Initialereignis.

6.2.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Kollision

Charakteristisch für Unfälle in Straßenverkehrstunneln ist das Auftreten folgender Unfalltypen:

- Unfalltyp 1: Fahr Unfall
(Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur)
- Unfalltyp 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall
(Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel)
- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr
(Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel im Tunnel)
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall
(z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Nachfolgende Tabelle 6 gibt die Verzweigungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensausmaß wieder:

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung		
[1] Unfalltyp	Grundlage für die Verzweigungswahrscheinlichkeiten bei den Kollisionen bildet Heft B 183.		
	Unfalltyp 1	19,2 %	
	Unfalltyp 3/6 (Zusammenstoß)	10,9 %	
	Unfalltyp 3/6	41,2 %	
	Unfalltyp 7	28,6 %	
	Summe	100 %	
[2] Ausmaßverteilung	Gemäß dem Adaptierungsvorschlag aus Heft B 183 wird von folgender Schadensausmaßverteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
	Unfalltyp 1	99,00 %	Keine Todesopfer
		0,95 %	1 Todesopfer
		0,01 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 3	99,85 %	Keine Todesopfer
		0,11 %	1 Todesopfer
		0,03 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 6	99,85 %	Keine Todesopfer
		0,11 %	1 Todesopfer
		0,03 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 7	99,82 %	Keine Todesopfer
		0,13 %	1 Todesopfer
		0,04 %	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

Zur Berechnung der Ausmaßverteilung eines Fahrzeugbrandes werden folgende Einflussgrößen im Ereignisablauf für das Initialereignis berücksichtigt:

- Fahrzeugtyp (Pkw = 5 MW, Bus / Lkw = 30 MW, Lkw = 100 MW)
- Brandverlauf (schnell / langsam)
- Verkehrsaufkommen (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr/ Vollstau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Alarm und Tunnelsperrung erfolgreich (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Erhöhtes Ausmaß (Reisebus ja / nein)
- Fremddrettung

Die zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände erforderlichen Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufes werden in nachfolgender Tabelle 7 näher erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung	
[1]	5 MW / 30 MW / 100 MW	Ausgehend vom Schwerverkehrsanteil wird angenommen, dass etwa 75 % der Brände infolge Kollision Pkw zugeordnet werden können. Für den verbliebenen Anteil werden 30 MW- und 100 MW-Brände mit nachfolgender Wahrscheinlichkeit im Verhältnis 94 % zu 6 % berücksichtigt. Dies führt zu folgenden Ansätzen:	
		Brandlast	Wahrscheinlichkeit
		5 MW	96,00 %
		30MW	3,76 %
		100MW	0,24 %
		Die gleiche Verteilung gilt für die Brände durch Selbstzündung infolge eines technischen Defekts.	
[2]	Brandverlauf	Es wird angenommen, dass Brände infolge von Unfällen zu 100 % einem schnellen Brandverlauf folgen. Die Brände infolge technischen Defekts nur zu 10 %, so dass 90 % durch einen langsamen (verzögerten) Brandverlauf gekennzeichnet sind.	
[3]	Verkehrsaufkommen je Zeitraum Tag/Nacht	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. Es wird folgende Verkehrsverteilung in den Bereichen Tag/Nacht berücksichtigt.	
		Zeitbereich	Verteilung Gesamtverkehrsaufkommen
		Tag (6-22 Uhr)	92,0 %
		Nacht (22-6 Uhr)	8,0 %
[4]	Verkehrszustand Fließender Verkehr / Vollstau	Die Anzahl der potenziell betroffenen Tunnelnutzer ist direkt abhängig vom vorherrschenden Verkehrszustand. 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. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können daher bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Im Regelfall (Referenz-tunnel) wird mit 50 h Stau pro Jahr aus verkehrlicher Überlast gerechnet, was einem Stauanteil von 0,57 % entspricht. Für den Josef-Deimer-Tunnel als Untersuchungs- bzw. Planfall wird davon ausgegangen, dass Mo-Fr an Arbeitstagen jeweils bis zu 2h Stau im Tunnel auftreten können. Damit sind etwa 460h Stau im Jahr zu erwarten.	
[5]	Detektion Ja / Nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 95 % erfolgt. Die EABT-80/100 fordern diese innerhalb von 60 Sekunden nach Brandbeginn. Dies stellt auch die Grundlage für den Referenz- bzw. Untersuchungstunnel dar. In den verbliebenen 5 % der Fälle wird ein Brand nicht erkannt. Für den Planfall 1 wird davon ausgegangen, dass ein Brand innerhalb von 40 sec erkannt werden kann.	

[6]	Tunnelsperrung Ja / Nein	Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führt 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 fünf von hundert Fällen eintritt.																														
[7]	Lüftungssystem Ja / Nein	Die Belüftung des Referenz- bzw. Untersuchungstunnels erfolgt über eine mechanische Ventilation. Nach erfolgter Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Es wird die Annahme getroffen, dass in fünf von hundert Fällen (5 %) das entsprechende Lüftungsprogramm nicht aktiviert wird.																														
[8]	Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	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 dies zu einer Vergrößerung des Schadensausmaßes führen kann, ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen. Aufgrund der Konstellation im Josef-Deimer-Tunnel mit mehreren Buslinien im Begegnungsverkehr werden erhöhte Schadensausmaße über den Regelansatz hinaus berücksichtigt. Es wird auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass in etwa 1,0 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist (25% des SV-Anteils wird Bussen zugerechnet). Für die Erhöhung des Ausmaßes wird, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal eine Menge von 40 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 20 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.																														
[9]	Fremdrettung	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. Aufgrund der Anfahrtswege zum Josef-Deimer-Tunnel ist davon auszugehen, dass die mittlere Eintreffzeit im Bereich von etwa 15-20 min liegt.																														
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Eintreffzeit</th> <th colspan="2">Eintreffwahrscheinlichkeit</th> <th rowspan="2">Ausmaßminderung</th> </tr> <tr> <th>Referenzstunnel</th> <th>Untersuchungstunnel</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>[min]</td> <td colspan="2">[%]</td> <td>[%]</td> </tr> <tr> <td>< 5</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>< 10</td> <td>20</td> <td>20</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>< 15</td> <td>40</td> <td>40</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>< 20</td> <td>39</td> <td>39</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>≥ 20</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Eintreffzeit	Eintreffwahrscheinlichkeit		Ausmaßminderung	Referenzstunnel	Untersuchungstunnel	[min]	[%]		[%]	< 5	0	0	30	< 10	20	20	20	< 15	40	40	10	< 20	39	39	5	≥ 20	1	1	0
		Eintreffzeit		Eintreffwahrscheinlichkeit			Ausmaßminderung																									
			Referenzstunnel	Untersuchungstunnel																												
		[min]	[%]		[%]																											
		< 5	0	0	30																											
		< 10	20	20	20																											
		< 15	40	40	10																											
< 20	39	39	5																													
≥ 20	1	1	0																													

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

H₀: Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses

P_i: Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i

6.3 Berechnung der Schadensausmaße

Während Schadensausmaße für die häufigeren Kollisionsereignisse mit eher geringen Folgen über entsprechende Unfallstatistiken bestimmt werden können, erfordern seltenere (Brand-)Ereignisse mit tendenziell höheren Schadensausmaßen aufgrund fehlender Datengrundlagen Modelle zur Berücksichtigung von tunnelspezifischen Merkmalen und zur Bestimmung von Ein- und Auswirkungen auf die Nutzer.

6.3.1 Schadensausmaße infolge Kollision

Wie bereits in Kapitel 6.2.3.1 dargestellt, hat die im Tunnel gefahrene Geschwindigkeit Einfluss auf das Unfallgeschehen. Folglich sind einige der Korrekturfaktoren auf die Eintrittshäufigkeit von Unfällen geschwindigkeitsabhängig. Der Heft B 183 verwendete Zusammenhang zwischen Unfällen und Geschwindigkeiten wird auf Grundlage des von Nielson entwickelten „power model“⁷ wie folgt beschrieben:

$$\frac{\text{Anzahl Unfälle nachher}}{\text{Anzahl Unfälle vorher}} = \left(\frac{\text{Geschwindigkeit nachher}}{\text{Geschwindigkeit vorher}} \right)^{\text{Exponent}}$$

Im Verfahren wird der Exponent auf 1 gesetzt. Es besteht damit ein linearer Zusammenhang zwischen veränderten Geschwindigkeiten und zu erwartenden Unfällen. Dies gilt ebenso bei der Berücksichtigung der Unfallschwere in Form der daraus resultierenden Schadensausmaße. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die bei einem Unfall auftretende kinetische Energie an und ist damit für erhöhte Schadensausmaße verantwortlich. Gemäß dem nachfolgenden Korrekturfaktor für die mechanische Einwirkung

$$f_{SA}^{mechanisch} = \left[\frac{v_{zul}}{80 \frac{km}{h}} \right]$$

wird ein geschwindigkeitsabhängiger Einfluss auf die Unfallschwere bei der Ermittlung der Schadensausmaße berücksichtigt. Der Grundwert von 1 liegt definitionsgemäß bei 80 km/h vor. Eine Geschwindigkeitserhöhung auf 100 km/h führt dementsprechend zu einem Faktor von 1,25. Werte von 50 km/h wie hier für einen innerstädtischen Tunnel zum Ansatz gebracht werden, führen zu reduzierten Schadensausmaßen. Die hohen kinetischen Energien bei Frontalkollisionen im Gegenverkehrsbetrieb können darüber ebenso abgebildet werden. Hier wird ein erhöhter Ansatz aufgrund der erhöhten Relativgeschwindigkeiten im Kollisionsfall berücksichtigt.

Zur Berechnung der Unfallrisiken ist es erforderlich, die in Tabelle 6 als Wertebereiche dargestellten Schadensausmaßklassen mit Ausmaßen als Einzelwerte zu belegen. Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird gemäß nachfolgender Tabelle 8 bestimmt. Sie sind abschließend mit dem geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktor anzupassen.

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

Im Fall eines Brandereignisses sind Tunnelnutzer durch die Einwirkungen von Wärme, Rauch und Schadgaskonzentrationen gefährdet. Deren Auswirkung auf die Tunnelnutzer ist abhängig von der Dauer und Intensität der Exposition gegenüber diesen Einwirkgrößen. Zur Quantifizierung der Auswirkungen müssen daher zunächst die Einwirkungen ermittelt werden.

⁷ Nilsson, G. (2004): *Traffic Safety Dimensions and the Effect of Speed on Safety, Bulletin 221, Lund Institute of Technology, Department of Technology and Society, Traffic Engineering*

Auf ihrer Flucht werden Tunnelnutzer im Wesentlichen durch Rauch, bestehend aus den Rußpartikeln und Rauchgasen, behindert. Rußpartikel führen zu einer Reduzierung der Sicht und Orientierung und bewirken starke Irritationen der Atemwege und Schleimhäute. Mit zunehmender Expositionsdauer kommen noch Einflüsse durch die Toxizität der Rauchgase und der Temperatureinwirkung hinzu (Mayer, 2006). In der Regel treten zunächst verstärkt Sichtbeeinträchtigungen durch die starke Raumentwicklung auf. Zur Abschätzung der jeweiligen Schadensausmaße wird daher der Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit verwendet. Durch Überlagerung dieses Zusammenhanges mit den numerisch berechneten Sichtweiten lassen sich in Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit und des Notausgangsabstands Selbstrettungsbereiche ableiten.

Hierzu wird für den Tunnelnutzer bei noch ausreichenden Bedingungen eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes Forschungsprojekt FE 15.0542/2011/ERB⁸ zeigen in Probandenversuchen, aber auch Literaturwerten, eine Bandbreite von 0,6 bis 1,7 m/s. Werden Grenzwerte unterschritten, so wird davon ausgegangen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

Über die Verknüpfung mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich anschließend für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenzahlen bestimmen.

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 Stoffhaltung. 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. Darüber hinaus lassen sich temperatur- und konzentrationsabhängige Detektoren nachbilden, wodurch das Regeln einer Lüftungsanlage simuliert werden kann.

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

1. Preprocessing (Dateneingabe)
2. Processing (Berechnung)
3. 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 bzw. notwendigen Genauigkeit der geometrischen Abbildung und der Rechenergebnisse.

Nach Festlegung der räumlichen Auflösung werden unter Berücksichtigung ergebnisneutraler Systemvereinfachungen folgende spezifische Merkmale des Tunnels:

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

⁸ FE 15.0542/2011/ERB: Reaktions- und Fluchtverhalten älterer Verkehrsteilnehmer in Straßentunneln, Forschungs- und Entwicklungsprojekt im Auftrag der BAST und des Bundesministeriums für Bau, Verkehr und Wohnungswesen (2012-2013)

Basis für die Umsetzung der jeweiligen Steuerungen bilden u. a. Gutachten zur Tunnelbelüftung.

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 Ausstattungsmerkmalen und falls erforderlich von Maßnahmen erzielen. Diese Wirkungsanalysen können auch zur Ableitung bzw. Verifizierung von entsprechenden Lüftungskonzepten dienen.

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

Nachfolgende Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Rauchausbreitung sowohl für den Referenz tunnel (im Staufall) als auch den Josef-Deimer-Tunnel. Zu erkennen ist dabei der unterschiedliche Einfluss der unterschiedlichen Lüftungssysteme von Referenzfall mit Längslüftung und Rauchabsaugung bzw. des Untersuchungsfalls mit Halbquerlüftung. Sie führen zu differierenden Strömungs- und Ventilationsbedingungen. Weitere Darstellungen mit unterschiedlichen Konstellationen wie Brandlast, Brandort, usw. finden sich im Anhang.

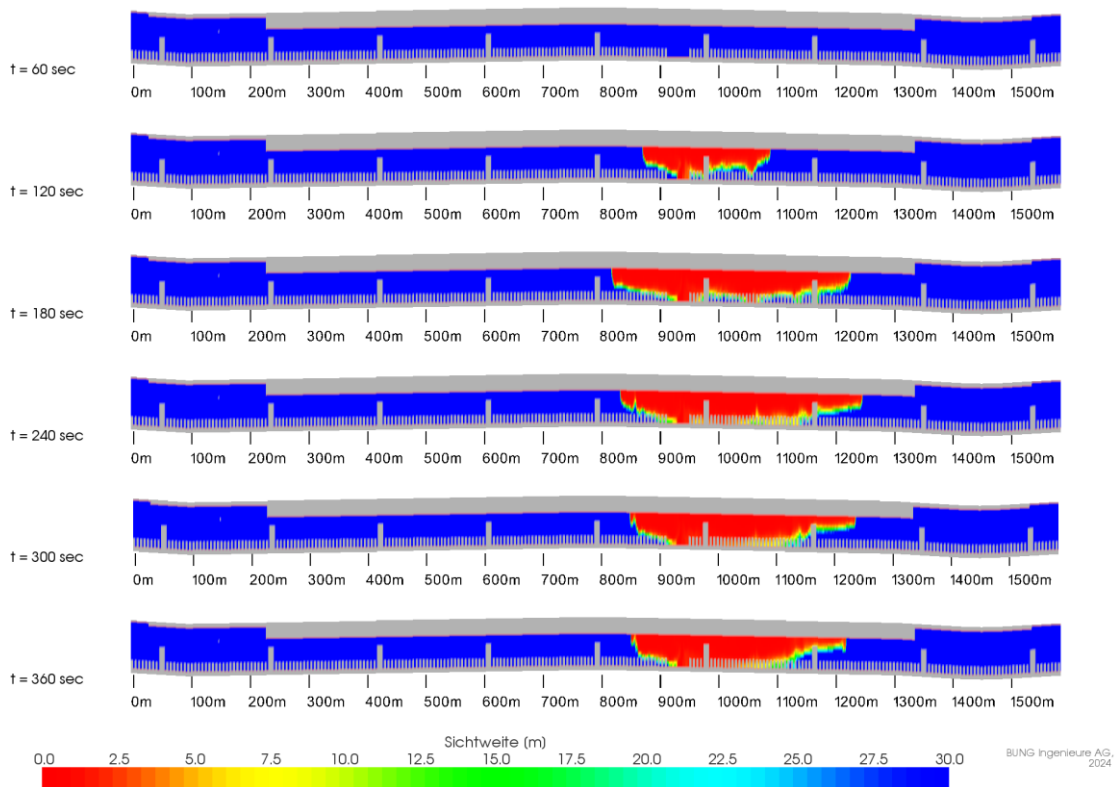


Abbildung 15: Berechnete Rauchausbreitung im Referenz tunnel gemäß EABT-80/100 bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)

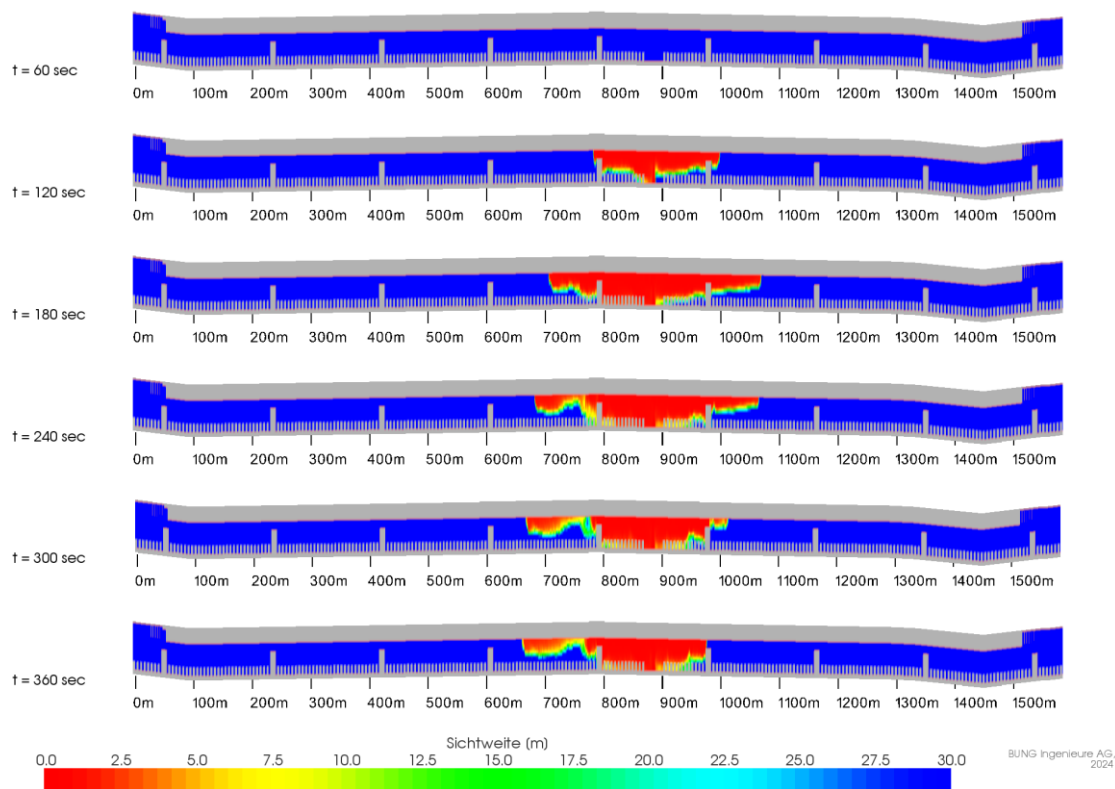


Abbildung 16: Berechnete Rauchausbreitung im Josef-Deimer-Tunnel (Untersuchungsfall) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)

6.3.2.2 Ermittlung von Auswirkungen (consequences)

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

Die Bestimmung von personenbezogenen Schadensausmaßen erfolgt hierbei mit Hilfe von Selbstrettungsbereichen unter Berücksichtigung von Einwirkungen auf den menschlichen Organismus, mittleren Fluchtgeschwindigkeiten von 1,3 m/s sowie dem Abstand von Notausgängen. Durch Überlagerung dieser Selbstrettungsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl im Gefahrenbereich erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen.

Nachfolgende Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen exemplarisch für den Referenz-tunnel sowie für den Untersuchungstunnel die resultierenden Selbstrettungsbereiche für die ersten 5 Minuten eines schnell ablaufenden Brandes dar.

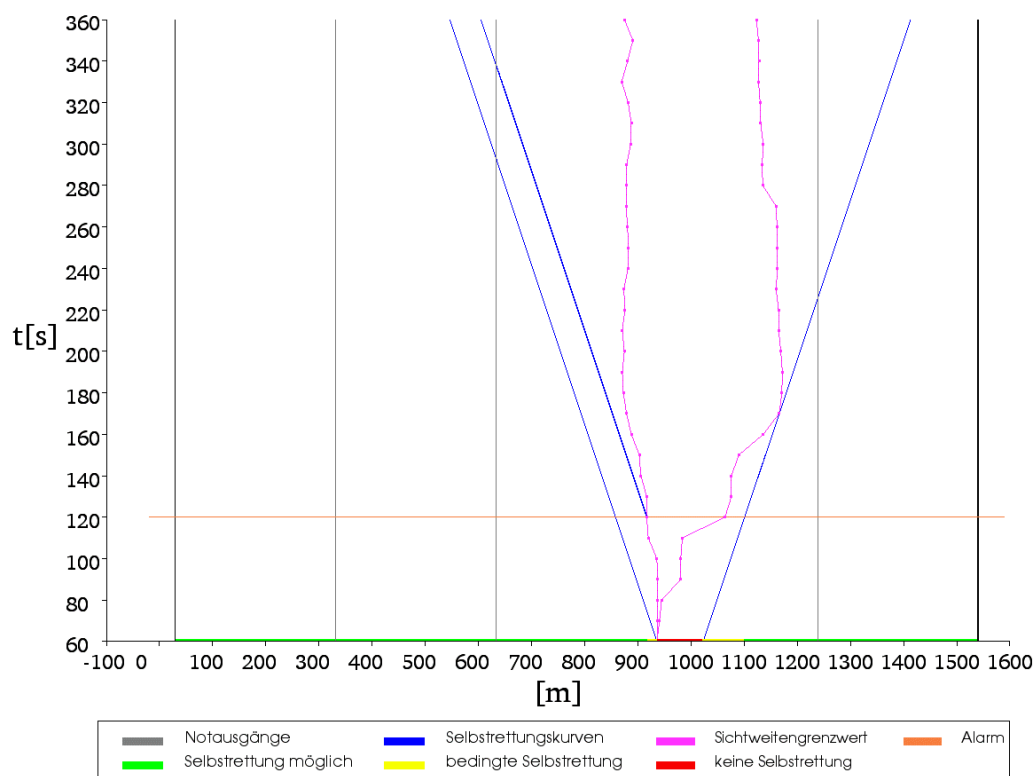


Abbildung 17: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Referenz-tunnel gemäß EABT-80/100 bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)

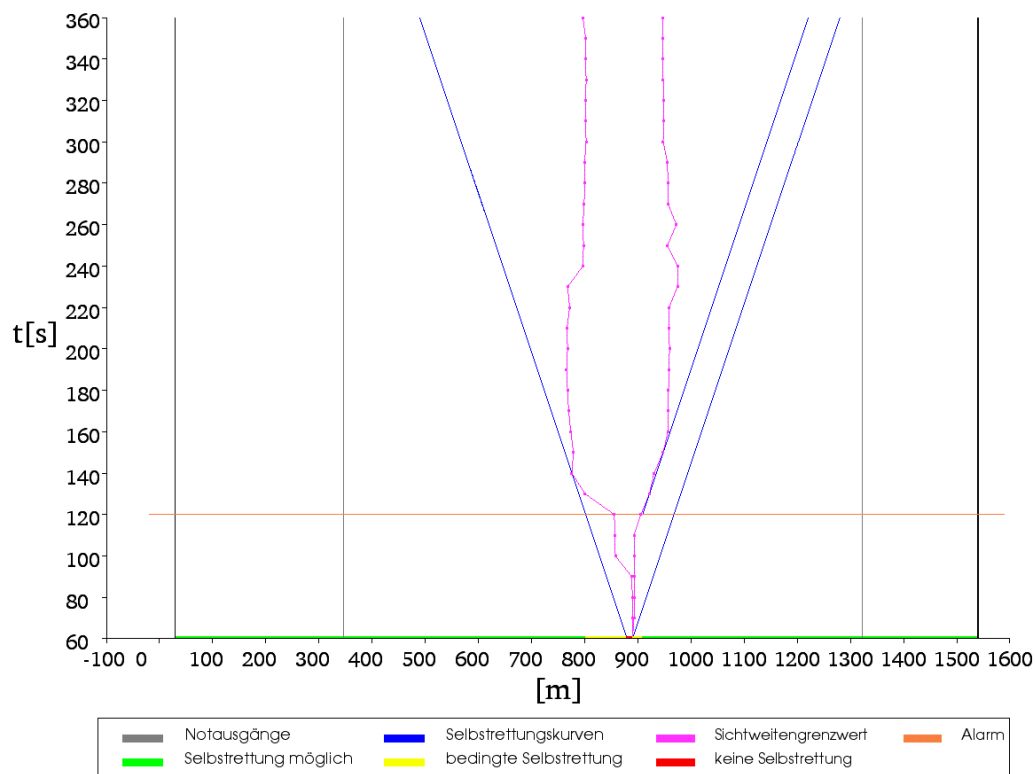


Abbildung 18: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Josef-Deimer-Tunnel (Untersuchungsfall) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)

Die positiven Effekten einer schnelleren Detektion zeigen sich in Abbildung 19. Durch die frühzeitige Erkennung eines Brandes können Tunnelnutzer sich früher zum nächstgelegenen Notausgang bewegen. Da sich kurz nach Brandbeginn die heißen Brandgase zunächst an der Tunneldecke sammeln, liegen dann (noch) günstige Fluchtbedingungen vor. Zusätzlich kann früher die Rauchabsaugung aktiviert werden und der Tunnel gesperrt, was sich beides ebenfalls positiv auf die Schadensausmaße im Tunnel auswirkt.

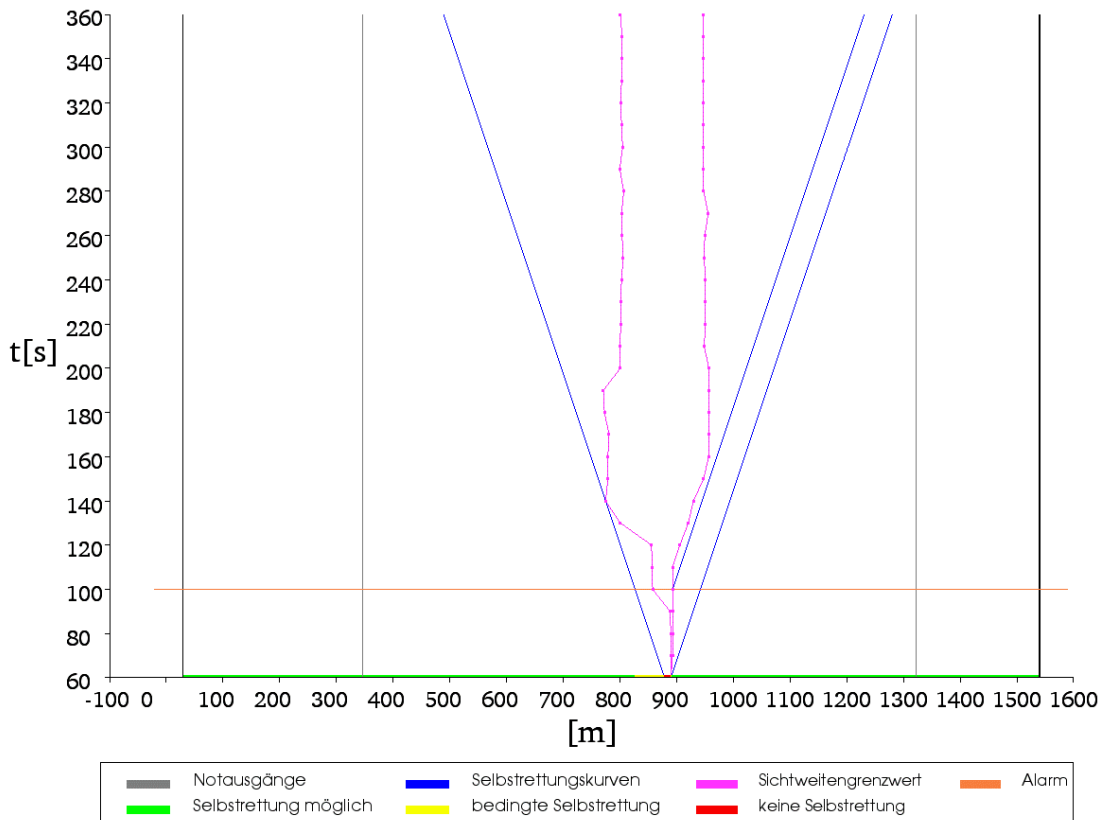


Abbildung 19: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Josef-Deimer-Tunnel (Planfall mit verbesserter Detektion) bei einem schnell ablaufenden 30-MW-Brand (Staufall)

Weitere Darstellungen der Selbstrettungsbereiche für die unterschiedlichen Untersuchungsszenarien finden sich im Anhang.

6.4 Risikoermittlung

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 für jedes Untersuchungsszenario ausgewiesen. Der Schadenserwartungswert bestimmt sich wie folgt:

$$R = \sum_{i=1}^m (H_{ei} \cdot A_{ei})$$

Mit:

- m: Anzahl der Endzustände im Ereignisbaum
- H_{e,i}: Häufigkeit der Endzustände
- A_{e,i}: Schadensausmaß für jeweiligen Endzustand

Zur Bestimmung und Darstellung der Risiken werden die im vorausgegangenen Kapitel 6.2 ermittelten Häufigkeiten der Endzustände mit den jeweils zugehörigen Schadensausmaße nach Kapitel 6.3 zunächst getrennt für das jeweilige Initialereignis nach der Größe der Schadensausmaße sortiert, und als Summenhäufigkeiten in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (HA-Diagramm) aufgetragen. In einem zweiten Schritt werden die so ermittelten Einzelergebnisse miteinander überlagert, um das Gesamtrisiko für die jeweilige Untersuchungsvariante zu erhalten.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung für den Referenzunnel und den Untersuchungstunnel als Summenhäufigkeitskurven getrennt für die einzelnen Ereignisarten sowie als überlagertes Gesamtrisiko dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass Brände mit schnellem Brandverlauf deutlich höhere maximale Schadensausmaße nach sich ziehen als Brände mit einer verzögerten Brandentwicklung. Im Referenzfall liegen die maximalen Schadensausmaße bei schnellem Brandverlauf bei bis zu 114 Personen, bei verzögertem Brand bei bis zu 77 Personen.

Im Nullfall, der dem Josef-Deimer-Tunnel im Nullfall entspricht, liegen diese Werte für einen schnellen Brandverlauf auf einem erhöhten Niveau mit maximal 183 Personen. Bei schnellem Brandverlauf breiten sich die Rauchgase schnell im gesamten Tunnel aus, besonders bei hohen Brandlasten trägt hier der große Notausgangsabstand im Nullfall zu den großen Schadensausmaßen bei. Bei einem verzögertem Brandverlauf sind dagegen bis zu 38 Personen betroffen. In diesem Fall zeigt die Halbquerlüftung Vorteile bei kleineren Brandlasten, da durch das Lüftungssystem, das ohne Mindestströmung in Längsrichtung die Rauchgase lokaler begrenzt bleiben.

Trotz des GV-Betriebs ergeben sich nur relativ geringe Unfallrisiken. Dies ist vorrangig durch die relativ geringen Fahrgeschwindigkeiten im Tunnel begründet. Als innerstädtischer Tunnel liegen die Geschwindigkeitsprofile deutlich geringer als bei einem Autobahntunnel mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von bis zu 100 km/h.

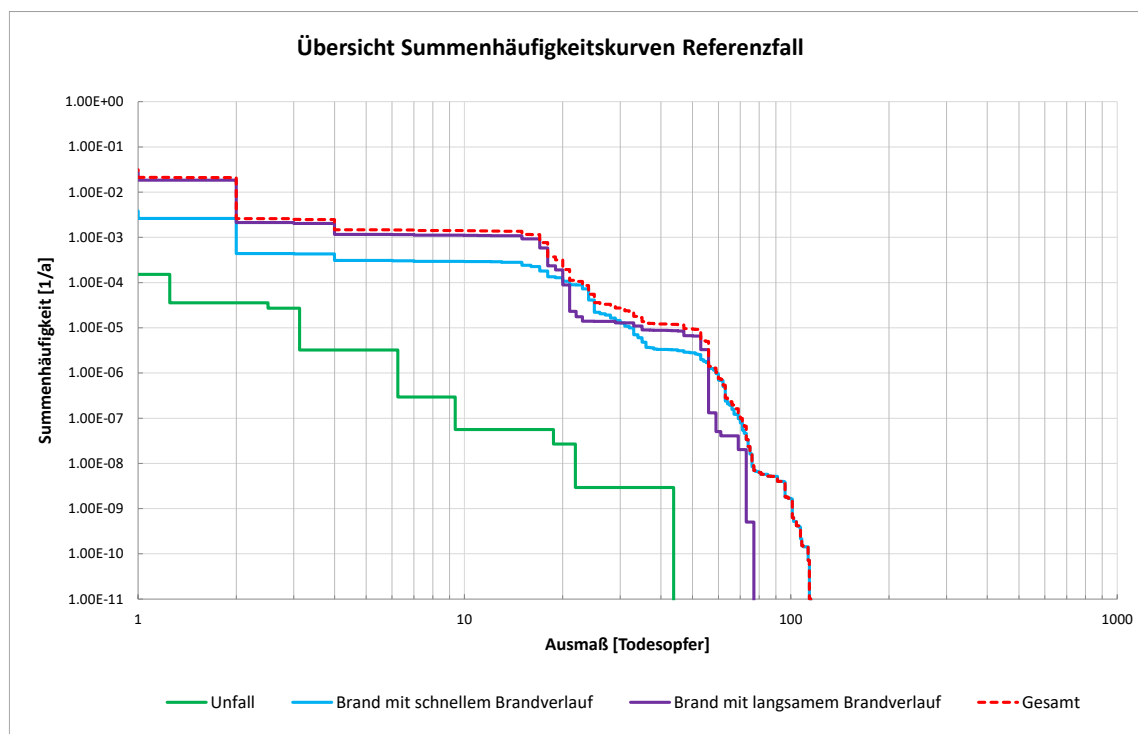


Abbildung 20: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Referenzfall)

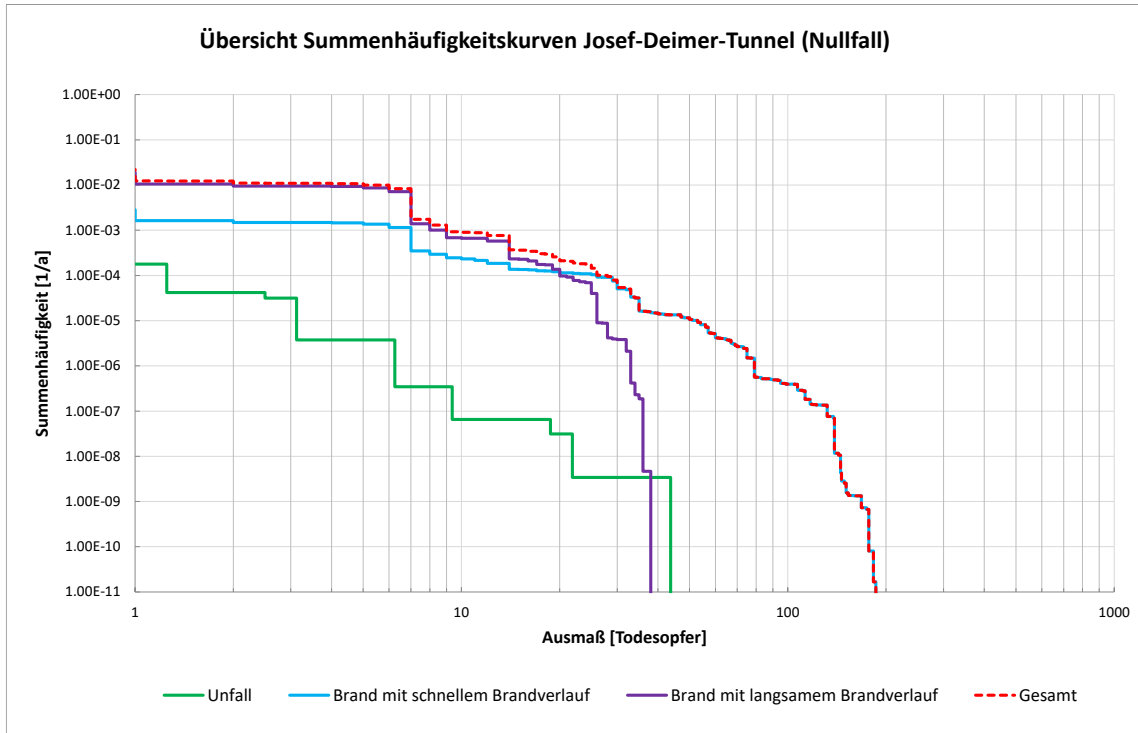


Abbildung 21: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Untersuchungsfall Josef-Deimer-Tunnel)

Um die Effekte in der Brandfrühphase mit dann noch geringer Brandlast zu verstärken, wird als effektive Maßnahme die Verkürzung der Detektionszeit auf 40 statt 60 s vorgeschlagen und als Planfall 1 untersucht. Deren positive Effekte sind in Abbildung 22 dargestellt. Hier zeigen sich besonders im für den Risikowert relevanten Bereich oben links in den Risikokurven Vorteile. Dort sind die häufigeren Ereignisse mit geringen Schadensausmaßen dargestellt.

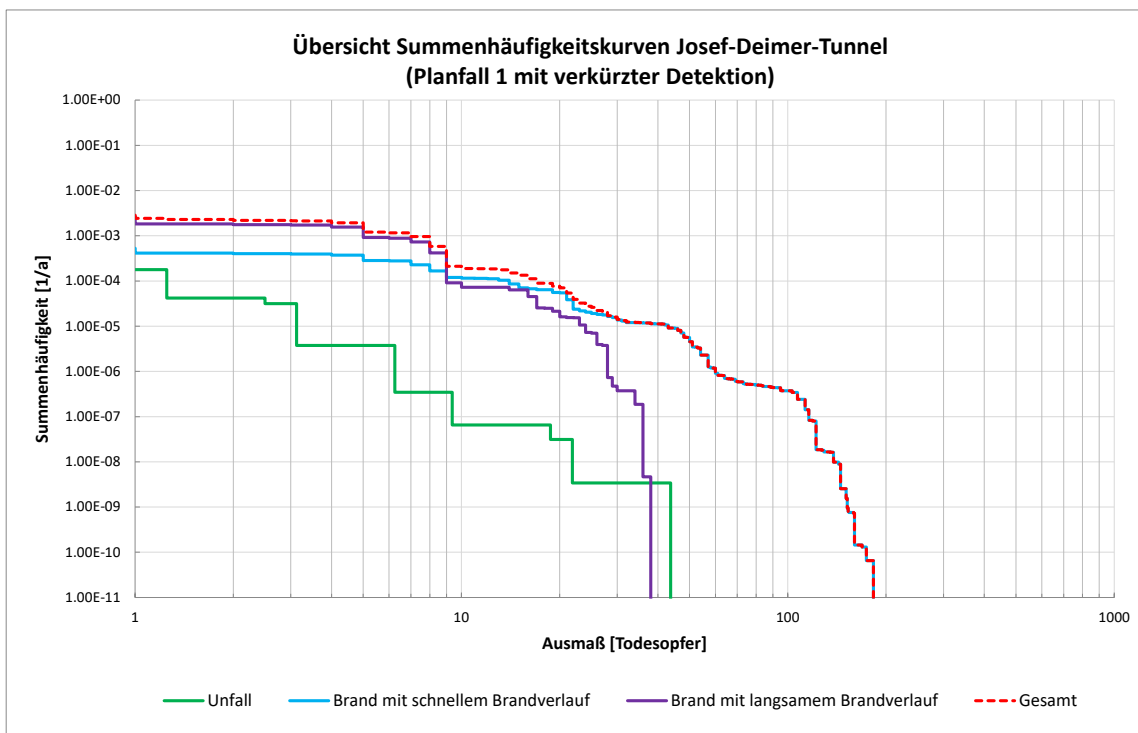


Abbildung 22: HA-Diagramm für die Ereignisarten Unfall und Brand (Planfall 1 Josef-Deimer-Tunnel)

6.5 Risikobewertung der Untersuchungsfälle

Die Auswirkungen der tunnelspezifischen Faktoren auf das Sicherheitsniveau im Josef-Deimer-Tunnel werden im Vergleich zum Referenzfall (richtlinienkonformer Tunnel mit Mindestausstattung) abschließend quantifiziert und bewertet. Eine vergleichende Darstellung des Referenz- und der Untersuchungsfälle als Summenhäufigkeitskurven zeigt nachfolgende Abbildung 23. Zur besseren Erkennbarkeit sind hier nur die Gesamtrisiken aufgetragen.

Im direkten Vergleich zwischen den Untersuchungsvarianten des Josef-Deimer-Tunnels und dem Referenzfall sind die Unterschiede grafisch ablesbar. Besonders gut ist zu erkennen, dass im Darstellungsbereich des Diagramms für den Nullfall, der den GV-Betrieb des Tunnels ohne weitere Maßnahmen repräsentiert, die maximalen Schadensausmaße deutlich über den Werten des Referenzfalls liegen. Die im Planfall 1 getroffenen Zusatzmaßnahmen führen demgegenüber zu Verbesserungen bei den Eintrittshäufigkeiten von Ereignissen mit geringeren Schadensausmaßen.

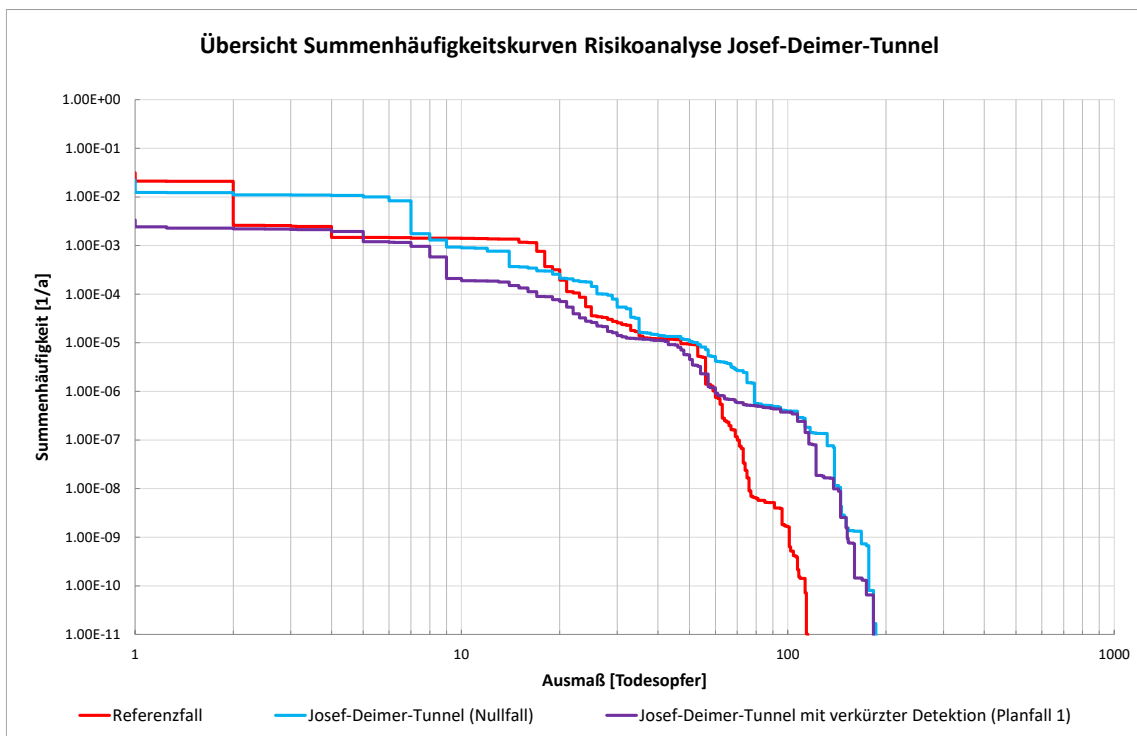


Abbildung 23: HA-Diagramm der Gesamtrisiken von Referenz-, Null- und Planfall

Die als Häufigkeits-Ausmaß-Diagramme dargestellten Risiken lassen sich auch als numerische Kenngrößen darstellen. In Tabelle 9 sind dazu zunächst die Punktrisikowerte als Schadenerwartungswerte der Untersuchungsvarianten Referenzfall bzw. Nullfall sowie dem weiteren Planfall 1 in einer tabellarischen Form als Absolutwerte gegenübergestellt.

Risikoanalyse Josef-Deimer-Tunnel	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt
Referenzfall gemäß Mindestanforderungen der RE-ING / EABT-80/100	0,00071	0,07746	0,07816
Nullfall Josef-Deimer-Tunnel	0,00083	0,09629	0,09711
Planfall 1 Josef-Deimer-Tunnel mit verkürzter Detektion	0,00083	0,01744	0,01857

Tabelle 9: Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten

Wie die Berechnungen zeigen, ergeben sich für den **Untersuchungsfall Josef-Deimer-Tunnel** sowohl bei den Unfall- aber besonders auch den Brandrisiken **deutliche Unterschiede im Sicherheitsniveau**. Die Schadenerwartungswerte liegen oberhalb der Referenzwerte, was **ohne weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen ein nicht ausreichendes Sicherheitsniveau** bedeutet. Die Brandrisiken weisen dabei den größten Anteil am Gesamtrisiko aus.

Tabelle 10 stellt abschließend den relativen Vergleich der ermittelten Risikowerte zueinander dar. Positive Prozentangaben stellen dabei Risikoerhöhungen im Vergleich zum Referenzniveau dar und sind in orange markiert. Negative Werte kennzeichnen dagegen Bereiche mit verbessertem Sicherheitsniveau und sind in grün dargestellt.

Risikoanalyse Josef-Deimer-Tunnel	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt
Referenzfall gemäß Mindestanforderungen der RE-ING / EABT-80/100	-	-	-
Nullfall Josef-Deimer-Tunnel	+ 17%	+ 24%	+24 %
Planfall 1 Josef-Deimer-Tunnel mit verkürzter Detektion	+ 17%	- 77 %	- 76 %

Tabelle 10: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Referenzfall)

In Kombination liegt das Gesamtrisiko des Nullfalls als Schadenerwartungswert demnach ohne weitere Maßnahmen etwa 24 % über dem des Referenzfalls. Die sicherheitskritischen Effekte sind dabei sowohl bei den Unfall- als auch den Brandrisiken vorhanden. **Es sind daher sicherheitserhöhende Maßnahmen erforderlich.**

Mit Berücksichtigung der vorgeschlagenen frühzeitigeren Detektion (Planfall 1) handelt es sich um eine reaktive Maßnahme, die sich auf die Brandrisiken auswirkt. Da sie hier der dominante Faktor bei der Risikowertbestimmung sind, führt ihre Beeinflussung auch zu einem verbessertem Gesamtrisiko als bestimmendes Maß für die Sicherheit im Josef-Deimer-Tunnel. Der Effekt ist im vorliegenden Fall so ausgeprägt, weil sich für einige Ereignisse mit geringen Ausmaßen im Referenzfall mit Berücksichtigung des Planfalls die zu erwartenden Schadensausmaße auf null reduzieren lassen, d.h. dass keine Person zu Schaden kommt. Der **Planfall 1 mit verkürzter Detektionszeit zeigt** damit als kompensatorische Maßnahme verbesserte Schadenerwartungswerte bei den Brandrisiken. Damit lassen sich auch die Gesamtrisiken positiv beeinflussen, so dass **eine ausreichende Gesamtsicherheit** vorliegt. Dabei sind als Voraussetzung auch die im Rahmen der Bestandsaufnahme der technischen Ausstattung gewonnenen Erkenntnisse zu berücksichtigen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegenden Untersuchungen hatten zum Ziel, das Sicherheitsniveau im Josef-Deimer-Tunnel zu bewerten. Die Bewertung der Brandrisiken erfolgte dabei mittels 3D-Ausbreitungsberechnungen, die detaillierte Aussagen zu den Bedingungen im Tunnel infolge eines Brandereignisses zulassen. Die Unfallrisiken wurden über statistische Werte auf Basis des Hefts B 183 ermittelt.

Dabei wurde festgestellt, dass aufgrund der im Josef-Deimer-Tunnel maximal zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h die Unfallrisiken nur einen geringen Anteil am Gesamtrisiko haben. **Wesentlichen Faktor bilden die Brandrisiken. Für diese Initialereignisse weist der Tunnel aufgrund seines Alters und der mittlerweile verschärften Anforderungen einige bauliche Aspekte mit negativen Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau.** So führt beispielsweise der schmale Tunnelquerschnitt zu eingeschränkten Fahrstreifenbreiten. Der im Tunnel vorhandenen Querschnitt RQ 10,0 T entspricht nicht mehr den Regelquerschnitten der aktuellen Regelwerke RE-ING 2003 bzw. EABT-80/100. Dies führt gemäß den in Heft B183 eingeführten Korrekturfaktoren für die Unfallhäufigkeiten zu erhöhten Risikowerten im Vergleich zum Referenzfall. Die innerstädtische Lage mit eingeschränkter Trassierungsmöglichkeiten führt in den Portalbereichen zu erhöhten Längsneigungen, die bei deutlich über 3% liegen, was zu einer verstärkten Rauchausbreitung im Tunnel führen kann. **Zudem werden die maximal zulässigen Notausgangsabstände teilweise deutlich überschritten, so dass Tunnelnutzer längere Fluchtwege in den nächstgelegenen sicheren Bereich zurücklegen müssen.**

Im Vergleich zwischen dem Referenzunnel gemäß den Mindestanforderungen der RE-ING bzw. EABT-80/100 und dem Untersuchungstunnel als Nullfall zeigt sich daher, dass der Josef-Deimer-Tunnel ohne sicherheitserhöhende Maßnahmen ein Sicherheitsniveau aufweist, das unter den Mindestanforderungen liegt. Die ermittelten Verhältnisse liegen dabei auf einem für Bestandstunnel mit dieser Nutzungsdauer üblichen Niveau. Die damals bei der Planung und Errichtung des Tunnels gültigen Vorgaben sind zwischenzeitlich deutlich verschärft worden. Die mittlerweile als kritisch zu bewertenden baulichen Faktoren im Josef-Deimer-Tunnel wie der Notausgangsabstand oder die Längsneigung lassen sich selbst nicht oder nur mit erheblichen finanziellen Mitteln und langen Bauzeiten beheben. **Es sind daher über die Bestandsaufnahme der technischen Ausstattung hinaus zusätzliche sicherheitserhöhende Maßnahmen erforderlich**, die in einem gesonderten Planfall 1 untersucht und quantitativ bewertet wurden.

Mit dem Fokus auf Umsetzbarkeit und Effektivität wurde dabei als sinnvolle Maßnahme die Auswirkung einer schnelleren Branddetektion vorgeschlagen und untersucht. Die aktuell gültigen Richtlinien fordern die Erkennung eines Brandes innerhalb von 60 sec. Sofern diese auf 40 sec reduziert werden kann, führt dies zu einem deutlich verbesserten Brand- und Gesamtsicherheitsniveau. Die Umsetzung sollte spätestens im Zuge der grundlegenden Erneuerung der technischen Infrastruktur erfolgen. Im Rahmen der Risikoanalyse wird unterstellt, dass die vorhandene sicherheitstechnische Ausstattung vollumfänglich funktionsfähig ist und dem aktuellen Stand der Technik entspricht. Im Zusammenspiel mit den weiteren sicherheitserhöhenden Maßnahmen aus der Bestandsaufnahme wie die grundlegende Sanierung der elektronischen Komponenten, liegt dann ein Sicherheitsniveau für den Josef-Deimer-Tunnel vor, das über den Mindestanforderungen der aktuell gültigen Richtlinien liegt. Es wird empfohlen zu prüfen, ob bis zur Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen durch geeignete, kurzfristige Maßnahmen eine Erhöhung des Sicherheitsniveaus erzielt werden kann.

Literaturverzeichnis

- Baltzer et al. (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
- Baltzer et al. (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)
- Baltzer et al. (2009) Baltzer, W., Kündig, P., Locher, P., Mayer, G., Riepe, W., Steinauer, B., Zimmermann, U., Zulauf, Ch. (2009): Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 66, ISBN 978-3-86509-909-9
- BAST (2013) FE 15.0542/2011/ERB: Reaktions- und Fluchtverhalten älterer Verkehrsteilnehmer in Straßentunneln, Forschungs- und Entwicklungsprojekt im Auftrag der BAST und des Bundesministeriums für Bau, Verkehr und Wohnungswesen (2012-2013)
- FGSV (2006) FGSV (2016): RABT – Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
- FGSV (2019) FGSV (2019): EABT-80/100 – Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h
- Mayer (2006) Mayer, G. (2006): Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- Kohl et al. (2022) Kohl, B.; Kammerer, H.; Heger, O.; Mayer, G.; Brennberger, S.; Zulauf, C.; Locher, P. (2022): Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Straßentunnel, Schlussbericht Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 183
- 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
- Mayer / Baltzer (2003) Mayer, G.; Baltzer W. (2003): Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Band 40, Bauverlag BV
- Mayer / Haastert (2006) Mayer, G.; Haastert J. (2006): Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43
- Mayer et al. (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

Mayer / Steinauer (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
MTFVTP (1995)	MTFVTP (1995): Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration
Nilsson (2004)	Nilsson, G. (2004): Traffic Safety Dimensions and the Effect of Speed on Safety, Bulletin 221, Lund Institute of Technology, Department of Technology and Society, Traffic Engineering
Steinauer et al. (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

Anhang Untersuchungsfälle

Fall	Lüftungssystem	Abstand Notausgänge	Anzahl untersuchter Brandorte	Brandverlauf	Brandleistung 5, 30, 100 MW	Verkehrsaufkommen Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich ja / nein	Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Fremdrettung	Anzahl Szenarien / Endzustände
Referenzunnel	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	5	11.520
Untersuchungstunnel Josef-Deimer-Tunnel (Nullfall)	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	5	11.520
Untersuchungstunnel Josef-Deimer-Tunnel (Planfall verkürzte Detektion)	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	5	11.520
Gesamt														34.560

Tabelle 11: Maßgebende Untersuchungsfälle

Fall	Lüftungssystem	Abstand Notausgänge	Anzahl untersuchter Brandorte	Brandverlauf	Brandleistung 5, 30, 100 MW	Verkehrsaufkommen Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich ja / nein	Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Fremdrettung	Anzahl Szenarien / Endzustände
Referenzunnel	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	1	2	1	1	1	2	1	1	72
Untersuchungstunnel Josef-Deimer-Tunnel (Nullfall)	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	1	2	1	1	1	2	1	1	72
Untersuchungstunnel Josef-Deimer-Tunnel (Planfall verkürzte Detektion)	Mechanische Lüftung	1	3	2	3	1	2	1	1	1	2	1	1	72
Gesamt														216

Tabelle 12: Erforderliche CFD-Simulationen