

Straßenbauverwaltung Freistaat Bayern	
Straße:	Station:
<b>B 15neu, A 92 - B 15</b> <b>Ost-Süd-Umfahrung Landshut</b>	
PROJIS-Nr.:	

# RAUMORDNUNGSVERFAHREN

## **Sicherheitsbewertung** **B 15neu Ost-Süd-Umfahrung Landshut** **Tunnel Nord 255 m / Tunnel Süd 395 m**

<p>aufgestellt: Staatliches Bauamt Landshut</p>  <p>Dreier, Baudirektor Landshut, den 16.12.2016</p>	

## **Sicherheitsbewertung**

**B 15n  
Ost-Süd-Umfahrung Landshut**

**Tunnel Nord 255 m  
Tunnel Süd 395 m**

Auftraggeber:  
Autobahndirektion Südbayern  
Abteilung Brücken und Ingenieurbau

Endabzug  
Oktober 2016

## **BUNG**

BUNG Ingenieure AG  
Englerstraße 4  
D-69126 Heidelberg

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

Mail: [info@bung-ag.de](mailto:info@bung-ag.de)  
[www.bung-gruppe.de](http://www.bung-gruppe.de)

### **in Zusammenarbeit mit:**



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](mailto:Stuttgart@consult.ptvgroup.com)  
[www.ptvgroup.com](http://www.ptvgroup.com)

### Verfasser:

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

### Verfasser:

Dr.-Ing. Georg Mayer  
Dipl.-Ing. (FH) Sven Brennerberger  
Dr.-Ing. Roozbeh Mousavi

## Inhalt

<b>1 Ausgangslage</b>	<b>6</b>
<b>2 Aufgabenstellung</b>	<b>6</b>
<b>3 Methodik</b>	<b>7</b>
<b>4 Gefährdungsanalyse</b>	<b>9</b>
4.1 Trassierung der Tunnel	9
4.2 Geometrische Verhältnisse	10
4.3 Bauliche Sicherheitseinrichtungen	12
4.4 Betriebstechnische Sicherheitseinrichtungen	14
4.5 Mögliches Gefährdungspotential	18
4.6 Verkehrsaufkommen	19
4.7 Unfallkennzahlen	24
4.7.1 Unfallrate	24
4.7.2 Verteilung der Unfalltypen	27
4.8 Analyse von Gefährdungsszenarien	31
4.8.1 Zielsetzung und Abgrenzung	31
4.8.2 Methodik und Vorgehen	31
4.8.3 Gefährdungsmatrix	32
4.8.4 Ausschluss von Szenarien - Erläuterungen zur Gefährdungsmatrix	33
4.9 Gefahrenanalyse relevanter Szenarien	37
4.10 Ergebnisse der Analyse von Gefährdungsszenarien	40
4.11 Wirkung der Einflussfaktoren	40
4.11.1 Längsneigung 5 %	40
4.11.2 Folge zweier Tunnel	42
<b>5 Qualitative Risikoanalyse</b>	<b>43</b>
5.1 Konzeption und Beurteilung der Wirkung von Maßnahmen	43
5.1.1 Herabsetzen der Geschwindigkeitsbeschränkung und Geschwindigkeitsüberwachung	44
5.1.2 Automatische Branddetektion in Kombination mit Kommunikations- und Sperreinrichtungen	45
5.1.3 Orientierungsbeleuchtung	46
5.1.4 Lüftungssteuerung mit Strahlventilatoren im Regelbetrieb	46
5.1.5 Verkehrstechnische Erfassungs- und Anzeigesysteme	47
5.1.6 Selbstleuchtende Markierungselemente auf den Notgehwegen	48
5.1.7 Verkürzung der Fluchtwege durch Querverbindungen zwischen den Röhren	49
5.1.8 Notrufstationen im Tunnel	49
5.1.9 Anordnung eines Seitenstreifens	50
5.2 Kostenwirksamkeit der Maßnahmen	51
5.3 Empfehlung	53
<b>6 Quantitative Risikoanalyse</b>	<b>56</b>
6.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung	56
6.2 Untersuchungsgrundlagen	56
6.3 Vorgehensweise	57

6.3.1	Häufigkeitsermittlung	58
6.3.2	Berechnung der Schadensausmaße	61
6.3.3	Ermittlung der Risiken	65
6.3.4	Risikobewertung	65
6.4	Untersuchungsvarianten	66
6.4.1	Referenzunnel (RABT-konform)	66
6.4.2	Untersuchungstunnel (Nullfall)	66
6.4.3	Untersuchungstunnel + Notausgang (Planfall 1)	67
6.4.4	Untersuchungstunnel + Geschwindigkeitsreduktion (Planfall 2)	67
6.4.5	Untersuchungstunnel + Detektion (Planfall 3)	67
6.4.6	Untersuchungstunnel + Notausgang und Detektion (Planfall 4)	67
6.5	Untersuchungsszenarien	67
6.5.1	Betriebsart	67
6.5.2	Brandort	67
6.5.3	Brandleistung (5 MW / 30 MW / 100 MW)	68
6.5.4	Verkehrsaufkommen differenziert nach Zeitraum (Tag / Nacht)	68
6.5.5	Verkehrszustand (freier Verkehr / Stau)	68
6.5.6	Alarmierung der Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion und Tunnelsperrung	69
6.5.7	Aktivierung des Lüftungssystems	70
6.5.8	Erhöhtes Schadensausmaß	70
6.5.9	Beginn der Fremdrettung	70
6.5.10	Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien	70
6.6	Untersuchungsergebnisse	73
6.6.1	Ermittlung der Häufigkeiten $H_0$ der Initialereignisse	73
6.6.2	Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ im Ereignisablauf	73
6.6.3	Ermittlung der Schadensausmaße	78
6.6.4	Risikoermittlung und Risikobewertung (Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm)	78
6.7	Empfehlungen	81
<b>7</b>	<b>Risikoanalyse Gefahrguttransporte (Kategorisierung)</b>	<b>82</b>
7.1	Ausgangslage und Aufgabenstellung	82
7.2	Untersuchungsgrundlagen	83
7.3	Untersuchungsszenarien	83
7.4	Vorgehensweise	85
7.5	Häufigkeitsermittlung	86
7.5.1	Definition von auslösenden Ereignissen	86
7.5.2	Entwicklung eines Ereignisablaufes	87
7.5.3	Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis	88
7.5.4	Bestimmung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf	89
7.5.5	Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf	96
7.6	Ermittlung der Schadensausmaße	96
7.6.1	Ermittlung von Einwirkungen (impacts)	97
7.6.2	Ermittlung von Auswirkungen (consequences)	106
7.7	Ermittlung der Risiken	115
7.7.1	Risiken infolge einer Benzinfreisetzung	115
7.7.2	Risiken infolge einer Propanfreisetzung	117
7.7.3	Risiken infolge einer Chlorfreisetzung	118
7.7.4	Risiken infolge einer TNT-Freisetzung	119

7.8	Risikobewertung und Kategorisierung gemäß ADR	120
7.9	Zusatzbetrachtung Tunnelverlängerung	122
7.10	Empfehlungen	123
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>125</b>
	<b>Anhang 1: Anhang zur Gefahrenanalyse</b>	<b>128</b>
	<b>Anhang 2: Anhang zur quantitativen Risikoanalyse</b>	<b>separate Unterlage</b>
	<b>Anhang 3: Anhang zur Gefahrgutanylse</b>	<b>separate Unterlage</b>

## 1 Ausgangslage

Infolge der topographischen Gegebenheiten und der gewählten Trassierungselemente werden in der Ost-Süd-Umfahrung von Landshut bei einer vorgesehenen Längsneigung von 5 % zwei unmittelbar aufeinanderfolgende Tunnelbauwerke erforderlich. Die Umfahrungsstrecke von der Bundesautobahn 92 (A 92) bis zur Bundesstraße 229 (B 299) ist in Abbildung 1 dargestellt.

Der kürzere Tunnel bei Eisgrub (Tunnel Nord; BW 51/1) ist mit einer Länge von 255 m und der Tunnel bei Frauenberg (Tunnel Süd; BW 51/2) mit einer Länge von 395 m geplant, kann jedoch optional auf 500 m verlängert werden.

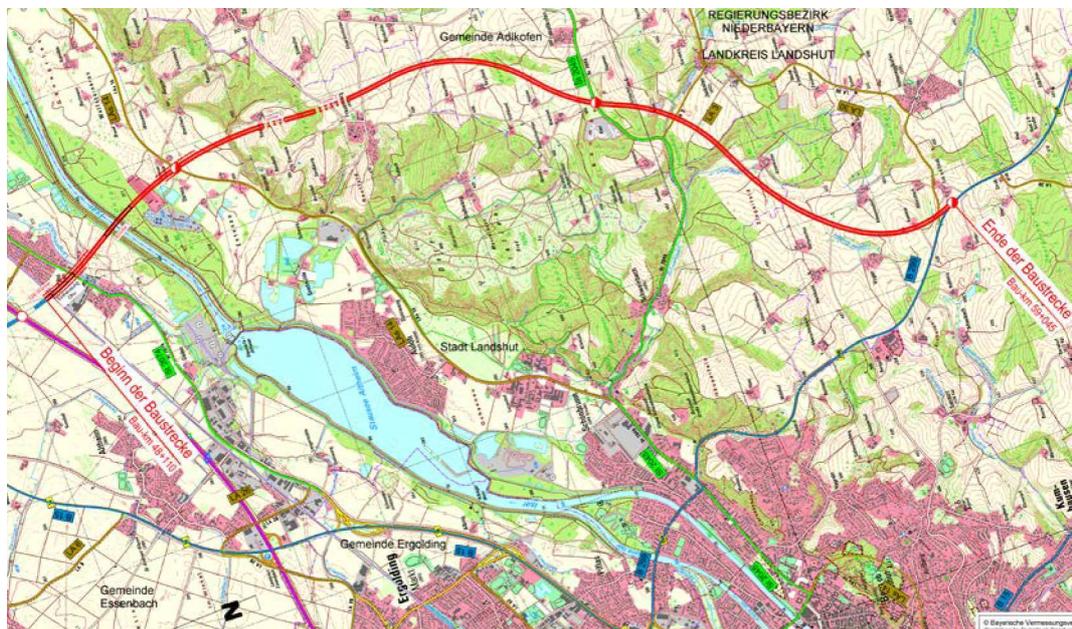


Abbildung 1: Übersichtslageplan [Quelle: Autobahndirektion Südbayern]

## 2 Aufgabenstellung

Für die zwei in Planung befindlichen Tunnel ist eine Risikoanalyse aufzustellen, um bauliche und betriebstechnische Maßnahmen festzulegen, die sowohl die Risiken infolge der geplanten Längsneigung von 5 % kompensieren als auch eine Zuordnung der Tunnel zur Kategorie A für die Gefahrguttransporte zulassen.

Ergänzend sollten Aussagen getroffen werden, ob die Gefahrguteignung auch dann noch positiv beurteilt wird, wenn die Tunnellänge des Tunnels Süd etwa aus planungsrechtlichen Gründen auf 500 m ansteigt und der Verkehr auf 30.000 Kfz/d ansteigt.

### 3 Methodik

Zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus der Tunnel und zur Festlegung von über die Vorgaben der RABT hinausgehenden Maßnahmen erfolgt eine Untersuchung in vier Stufen:

Stufe 1: Gefährdungsanalyse

Stufe 2: Qualitative Sicherheitsbetrachtung

Stufe 3: Quantitative Risikoanalyse

Stufe 4: Risikoanalyse für Gefahrguttransporte (Kategorisierung)

#### Gefährdungsanalyse

In Stufe 1 wird eine allgemeine Gefährdungsanalyse durchgeführt. Die grundsätzlichen Einflussfaktoren auf die Sicherheit der Tunnelnutzer sowie der Einsatzkräfte und des Betriebsdienstes aufgrund der Trassierung im Lage- und Höhenplan und der Tunnelausstattung werden abgeleitet und deren Einflüsse auf ein mögliches Schadensausmaß und/oder die Schadenshäufigkeit abgeschätzt. Die Gefährdungsanalyse hat das Ziel, die für die Sicherheit maßgeblich relevanten Einflussfaktoren herauszufiltern und Eingangsparameter für die weiteren Untersuchungsstufen festzulegen.

#### Qualitative Sicherheitsbetrachtung

In der Stufe 2 werden anhand der Faktoren aus Stufe 1 Maßnahmen konzipiert, durch die mögliche Risiken der beiden Tunnel kompensiert werden können. Diese werden einer qualitativen Bewertung unter Berücksichtigung einer Kostenwirksamkeit unterzogen. Es wird eine einfache und plausible Bewertungsmatrix aufgestellt, die zum einen das Risikominderungspotenzial und zum anderen die Kostenwirksamkeit berücksichtigt.

#### Quantitative Risikoanalyse

Für die in Stufe 2 abgeleiteten zweckmäßigsten Kompensationsmaßnahmen wird in Stufe 3 eine quantitative Risikobewertung durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchung wird prinzipiell unterschieden zwischen der beabsichtigten Lösung des Tunnels (Untersuchungstunnel) und einer richtlinienkonformen Ausführung des Tunnels (Referenzstunnel). Der Referenzstunnel unterscheidet sich vom Untersuchungstunnel dadurch, dass er eine Längsneigung von 3 % aufweist.

Die Sicherheitsniveaus der Tunnellösungen werden getrennt ermittelt und vergleichend einander gegenübergestellt. Die Bestimmung des jeweiligen Sicherheitsniveaus erfolgt nach dem Verfahren zur "Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" gemäß Heft 66 [SB FE 2009]. Dadurch werden sowohl Scha-

densausmaße als auch deren Eintrittshäufigkeiten berücksichtigt. Als Maß für die Sicherheit dient das Risiko, das aus der Verknüpfung der Eintrittswahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen resultiert. Mit Hilfe von sog. Häufigkeits-Ausmaßdiagrammen (HA-Diagramme) ist es schließlich möglich, die jeweils ermittelten Sicherheitsniveaus einander vergleichend gegenüberzustellen.

Unterscheiden sich die Sicherheitsniveaus des Untersuchungstunnels und des Referenztunnels signifikant voneinander, so werden für den Untersuchungstunnel die Wirkungen einzelner Maßnahmen, mit denen ein vergleichbares Sicherheitsniveau erzielbar wird, untersucht. Die Wirkung der Maßnahmen wird in den sog. Planfällen betrachtet.

Ziel ist es, die geplanten Tunnel durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen auf einen Sicherheitsstandard zu bringen, der dem des Vergleichstunnels mindestens entspricht. Die Durchführung der Untersuchung erfolgt entsprechend der Festlegung in Abschnitt 3.3.3 der RABT 2016 [RABT 2016].

#### Risikoanalyse für Gefahrguttransporte (Kategorisierung)

In Stufe 4 wird überprüft inwieweit die Tunnel (geplante Tunnel einschließlich der Kompensationsmaßnahmen) dazu geeignet sind, den Transport von gefährlichen Gütern uneingeschränkt zu zulassen. Die Durchführung der Untersuchung erfolgt gemäß der Festlegung in Abschnitt 3.3.4 der RABT 2016 nach dem im Forschungsbericht [FE ADR 2009] beschriebenen Verfahren zur Kategorisierung von Tunneln.

Es wird eine vertiefte Analyse (gemäß Stufe 2a des Verfahrens) zur Bestimmung des intrinsischen Risikos der Tunnel mit Hilfe von detaillierten Modellen vorgenommen.

Zur Bewertung der Risiken wurde im Verfahren zur Kategorisierung von Tunneln als Bewertungsmaßstab eine Vergleichsgerade definiert (siehe Abbildung 2).

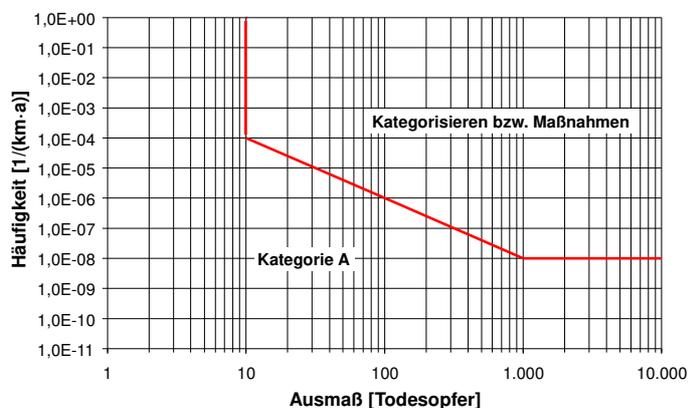


Abbildung 2: Vergleichskurve [FE ADR 2009]

Wird die Vergleichsgerade von der Gesamtsummenhäufigkeitslinie einer Kategorie überschritten, so ist der Tunnel für den Transport von Gefahrgütern dieser Kategorie zu beschränken. Für die hier zu untersuchenden Tunnel wird im Fall einer sich ergebenden Beschränkung dann überprüft, inwieweit durch weitere sicherheitssteigernde Maßnahmen eine Beschränkung vermieden werden kann.

## 4 Gefährdungsanalyse

Im Folgenden werden die geplanten baulichen und betriebstechnischen Ausstattungsmerkmale der beiden Tunnel aufgeführt und analysiert. Zudem erfolgt eine Auswertung des prognostizierten Verkehrsaufkommens und zu erwartenden Lkw-Anteils. Ziel der Gefährdungsanalyse ist die Spezifizierung von Einflussfaktoren unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Merkmale.

### 4.1 Trassierung der Tunnel

Die beiden Richtungsverkehrstunnel sind im Zuge der Ost-Süd-Umfahrung von Landshut auf der neuen Bundesstraße 15 (B 15n) geplant. Die Tunnel verlaufen in Nord-Süd Richtung und überwinden südlich der Isar den Aufstieg der Trasse auf das südliche Isarhochufer.

Der kürzere Tunnel bei Eisgrub, genannt Tunnel Nord, weist eine Länge von 255 m (von Bau-km 51+080 bis km 51+335) und der Tunnel zwischen Birnkofen und Frauenberg, genannt Tunnel Süd, eine Länge von 395 m (von Bau-km 51+645 bis km 52+040) auf.

Die freie Strecke zwischen den Tunneln beträgt 310 m.

Im Abstand von ca. 300 m Entfernung zum Nordportal des Tunnels Nord ist eine Grünbrücke mit einer Bauwerkslänge von 50 m geplant. Aufgrund der kurzen Länge sind keine relevanten Auswirkungen hinsichtlich der zu erwartenden Risiken im Verlauf des Streckenabschnitts zu erwarten. Die Grünbrücke wird daher im weiteren Verlauf der Sicherheitsbewertung vernachlässigt.

Zwischen den Anschlüssen der B 15n an die A 92 (Essenbach) und die B 299 (Geisenhausen) sind zwei weitere Anschlussstellen an der Kreisstraße LAs 14 und an der Staatsstraße ST 2045 bei Adlkofen vorgesehen. Südlich der Anbindung an die LAs 14 quert die B 15n die Isarhangleiten mit den zwei zu betrachtenden Tunneln.

Die Anschlussstelle der LAs 14 zur B15 n befindet sich ca. 1.000 m nördlich des Tunnels Nord. Ab der Anschlussstelle steigt die Gradienten der B 15n in Richtung Süden auf einer Länge von ca. 2.230 m mit 5 % an. Der Tunnel Süd befindet sich im Bereich einer Kuppenausrundung, welche im Tunnel rund 267 m vor dem Südportal (Bau-km 51+772,88) beginnt. Am Südportal des Tunnels liegt daher



lenden Portalbereiche verwendet. Die Röhren werden im Richtungsverkehr betrieben.

Jede Tunnelröhre umfasst zwei Fahrspuren mit einer Breite von je 3,75 m (3,50 Fahrstreifen + 0,25 m Randstreifen). Die Fahrbahnbreite zwischen den Borden beträgt demnach 7,50 m. Beidseitig werden 1,00 m breite Notgehwege mit 3 cm hohen Borden angeordnet. Die Realisierung von Seitenstreifen ist nicht vorgesehen. Somit ergibt sich eine Querschnittsbreite von insgesamt ca. 9,50 m. Die lichte Höhe über der Fahrbahn beträgt 7,04 m. Über den beidseitig angeordneten Notgehwegen weist das Lichtraumprofil gemäß den Vorgaben der [RABT 2016] eine Höhe von mind. 2,25 m auf.

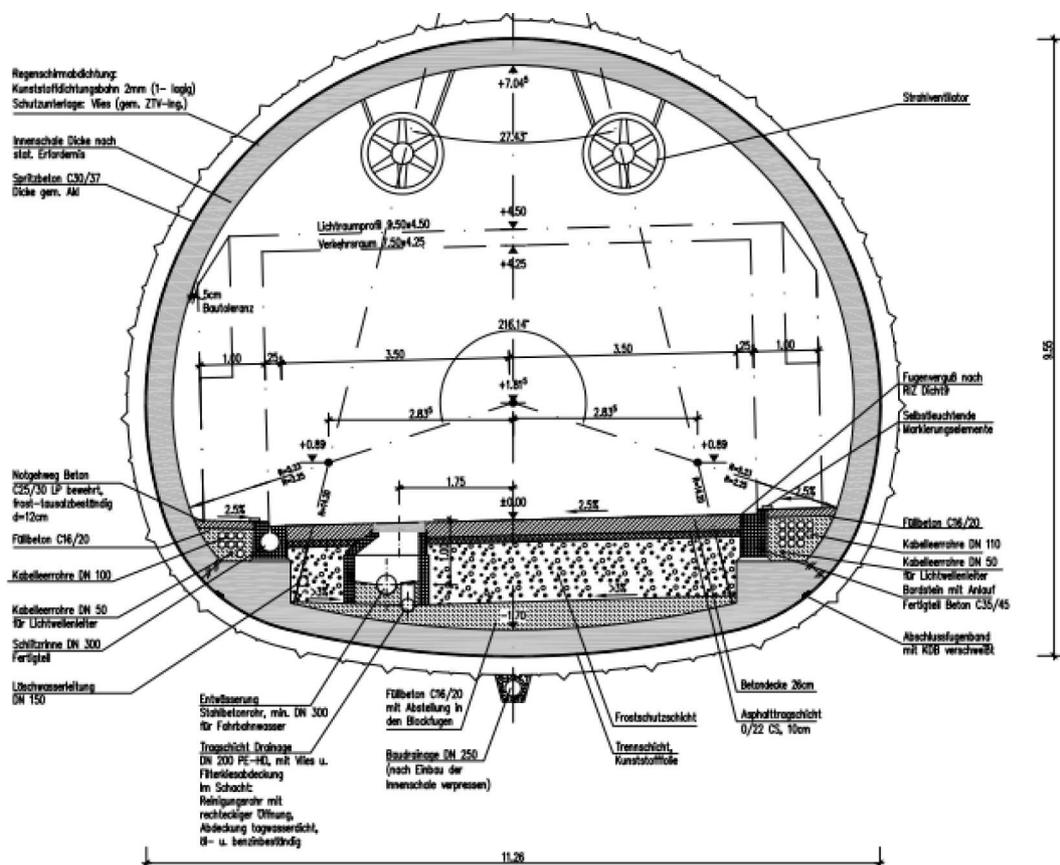


Abbildung 4: Querschnitt der Tunnel Eisgrub<sup>1</sup> (Quelle: Autobahndirektion Südbayern)

Die Querneigung beträgt von Nord nach Süd im Bereich der Rechtskurve vor dem Tunnel Nord und durch den Tunnel Nord 2,5 % nach rechts. Unmittelbar nach dem Südportal wird ein Querneigungswechsel von 2,5 % nach rechts auf 2,5 % nach links angeordnet (auf einer Länge von ca. 50 m). Die Querneigung von 2,5 % nach links ist anschließend über die Klothoide  $A = 1.200$  auf der restlichen freien Strecke und durch den Tunnel Süd hindurch gleichbleibend vorhan-

<sup>1</sup> Hier aufgrund der ursprünglichen Planung mit 2.100 m Tunnellänge noch mit Ventilatoren abgebildet.

den, einschließlich der an das Südportal des Tunnels Süd anschließenden Strecke.

In Tabelle 9 sind die Parameter der derzeit geplanten Tunnelbauwerke zusammenfassend aufgeführt.

Parameter	Bauwerk BW51/1 Tunnel Nord	Bauwerk BW51/2 Tunnel Süd
Verkehrsart	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr
Tunnellänge	255 m	395 m (ggf. 500 m)
Bau-km	51+080 bis 51+335	51+645 bis 52+040
Bauweise	offene und bergmännische Bauweise	offene und bergmännische Bauweise
Querschnitt	RQ 31 t (gem. [RABT 2016])	RQ 31 t (gem. [RABT 2016])
Anzahl Fahrstreifen	2 Fahrstreifen je Röhre	2 Fahrstreifen je Röhre
lichte Tunnelbreite Fahrspuren Notgehwege	9,50 m 2 x 3,75 m 2 x 1,00 m	9,50 m 2 x 3,75 m 2 x 1,00 m
Trassierungsparameter (von Nord nach Süd)	A = 1.100 m	A = 1.200 m über ca. 106 m R = 3.500 m über ca. 289 m
Längsneigung (von Nord nach Süd)	5 %	5 % Tangentenneigung; ab Bau km 51+772,88 Kuppenaus- rundung, daher am Südportal nur ca. 3,1 % tatsächliche Längsneigung
Querneigung (von Nord nach Süd)	2,5 % nach rechts; Querneigungs- wechsels im unmittelbaren Bereich des Südportals	2,5 % nach links

Tabelle 1: Tunnelparameter

### 4.3 Bauliche Sicherheitseinrichtungen

#### Nothalte- und Pannenbuchten

Gemäß den Vorgaben der [RABT 2016] sind in beiden Tunneln keine Nothalte- und Pannenbuchten erforderlich. Diese sind bei Tunneln ohne Seitenstreifen ab einer Tunnellänge von 900 m erforderlich, bei besonderen Gegebenheiten ab 600 m (z. B. besondere Charakteristik durch Kombination mehrerer risikobeeinflussender Faktoren).

Die Anordnung einer Nothalte- und Pannenbucht je Fahrtrichtung ist jedoch im Bereich der Zwischenstrecke aufgrund des nicht vorgesehenen Seitenstreifens zweckmäßig. Die Buchten dienen insbesondere einem sicheren Abstellen von Fahrzeugen mit technischem Defekt und somit der Minimierung von Behinderungen des nachfolgenden Verkehrs.

### Notgehwege

Beidseitig der Fahrbahnen sind Notgehwege mit einer Breite von  $\geq 1,0$  m vorgesehen. Diese werden von der Fahrbahn durch Borde mit 3 cm Höhe begrenzt.

### Notausgänge, Flucht- und Rettungswege

Derzeit sind keine Notausgänge für die Tunnel geplant. Als Fluchtwege ins Freie dienen die Tunnelportale, deren Abstand zueinander 255 bzw. 395 m beträgt.

Die Tunnelröhren stellen demnach den Rettungsweg dar. Eine mechanische Lüftung ist nicht vorgesehen, so dass im Brandfall die Rauchgase durch die Thermik entsprechend der Längsneigung von Nord nach Süd geführt werden (Kaminwirkung).

Gemäß den Anforderungen der RABT sind Notausgänge erst bei einer Tunnellänge  $\geq 400$  m in regelmäßigen Abständen von  $\leq 300$  m anzuordnen.

### Ausbildung der Wände und Portale

Die Tunnelwände weisen keine Vor- und Rücksprünge auf, ausgenommen solche, die gemäß den RABT aus betrieblichen und sicherheitstechnischen Gründen erforderlich sind.

Die Tunnelportalbereiche sind so zu gestalten, dass Regellösungen nach den RPS<sup>2</sup> zum Einsatz kommen können.

### Entwässerung

Zur Ableitung von Flüssigkeiten, insbesondere im Hinblick auf die Freisetzung von gefährlichen Gütern, ist gemäß den Vorgaben der RABT über die gesamte Tunnellänge eine Schlitzrinne vorzusehen. Diese ist im Abstand von höchstens 50 m über einen Siphon oder über einen Schacht mit Tauchwand an die Längsentwässerungsleitung anzuschließen. Aus Brandschutzgründen muss die Schlitzrinne hinter jeder Abzweigung zur Hauptleitung eine Abschottung erhalten.

Das Entwässerungssystem ist gemäß den Vorgaben der ZTV-ING Teil 5 - Tunnelbau auszuführen. Demnach sind die Entwässerungssysteme des Tunnels und der Rampen (offene Ein- und Ausfahrtsbereiche) möglichst zu trennen. Auf den Tunnel zufließende Wässer sowie ggf. andere Flüssigkeiten sind möglichst vor dem Tunnelportal abzufangen und einem Rückhaltebecken zuzuleiten. Wird das anfallende Oberflächenwasser aus dem Rampenbereich in die Tunnellängsentwässerung eingeleitet, sind die Abläufe über einen Siphon oder Schacht mit Tauchwand anzuschließen.

---

<sup>2</sup> Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme

Vor Einleitung in die Vorflut ist eine Rückhalteeinrichtung für die Fahrbahntwässerung vorzusehen, die Schadflüssigkeiten automatisch auffängt.

Gradiente, Querneigung und Fläche der Fahrbahn sowie die hydrogeologischen Verhältnisse im Tunnelbereich bestimmen maßgebend die Bemessung der Entwässerungsanlagen. Zusätzlich sind die in den RABT angegebenen Bemessungsgrößen zu berücksichtigen.

Die beiden Tunnel Nord und Süd sind entsprechend den Vorgaben der RABT bzw. ZTV-ING mit einer Schlitzrinne am tiefliegenden Fahrbahnrand auszustatten. Die Schlitzrinne ist in Abständen von  $\leq 50$  m abzuschotten, an die Längsentwässerungsleitung anzuschließen und einem Havariebecken zuzuführen.

Für die Tunnel und ihre Vorportalbereiche sollten getrennte Entwässerungssysteme vorgesehen werden.

#### Rettungsüberfahrten an den Portalen

Nach den Vorgaben der RABT sind zwischen den Richtungsfahrbahnen jeweils vor den Portalen Rettungsüberfahrten für die Einsatzdienste anzuordnen. Diese müssen eine lichte Breite von 4 m aufweisen und sind zu befestigen. Erforderliche Sperrvorrichtungen müssen von den Einsatzkräften schnell und ohne zusätzliches Personal geöffnet werden können.

Die gemäß den RABT erforderlichen Rettungsüberfahrten sind im Bereich der 310 m langen freien Strecke zwischen den Tunneln Nord und Süd sowie vor dem Nordportal des Tunnels Nord und dem Südportal des Tunnels Süd vorzusehen.

## **4.4 Betriebstechnische Sicherheitseinrichtungen**

Für die betriebstechnische Ausstattung der Tunnel ist eine RABT-konforme Ausführung vorgesehen. Der Sicherheitsbewertung werden daher bezüglich der Sicherheitseinrichtungen, Beleuchtung, verkehrstechnischen Einrichtungen, Zentralen Anlagen, Leit-, Automatisierungstechnik und Überwachung die Anforderungen der [RABT 2016] für Richtungsverkehrstunnel  $< 400$  m zu Grunde gelegt.

#### Notrufeinrichtungen

Für jede Fahrtrichtung wird jeweils vor und nach den Tunnelbauwerken im Portalbereich eine Notrufsprechstelle nach den RABT vorgesehen.

Diese sind gemäß den RABT unter Berücksichtigung der Regelungen der RPS (Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme) im Abstand von ca. 30 bis 70 m zum Tunnelportal anzuordnen.

Um Verkehrsteilnehmer, welche ihr Fahrzeug in der Pannenbucht auf der freien Zwischenstrecke abgestellt haben, die Möglichkeit der Schadensmeldung zu bie-

ten, ist die Anordnung einer Notrufsprechstelle im Bereich der Nothalte- und Pannenbuchten zweckmäßig.

#### Videoüberwachung

Eine Videoüberwachung ist nach den RABT nicht erforderlich.

#### Tunnelfunk

Nach Fertigstellung der Rohbauarbeiten hat eine Feldstärkenmessung zur Überprüfung der funktechnischen Ausleuchtung durch die Feldversorgung zu erfolgen. In Abhängigkeit der objektbezogenen Messungen sind die Notwendigkeit eines Tunnelfunksystems und dessen Ausprägung zu ermitteln.

Die in den RABT aufgeführten Funkdienste müssen ständig unterbrechungsfrei in den Tunnelröhren, ggf. Querstollen, Technikräumen, Rettungswegen und dergleichen zur Verfügung stehen. Unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten sind im Umkreis von 150 m um die Tunnelportale, gegebenenfalls auf den Stellflächen der Einsatzdienste, auf allen Zufahrten zu den Tunneln sowie in den Betriebsgebäuden alle netzunabhängigen Funkkanäle gemäß den RABT verfügbar zu halten.

#### Verkehrsfunk/Radio

Gemäß den RABT ist in den Tunneln mindestens der Empfang eines UKW-Rundfunksenders mit Verkehrsfunkkennung zu gewährleisten.

Erst bei Tunneln ab 400 m ist gemäß den RABT mit den Rundfunkanstalten zu vereinbaren, dass eine Unterbrechung der Sendung für Durchsagen im Bereich des Tunnels möglich ist.

#### Lautsprecher

Gemäß den RABT sind Tunnel, die videoüberwacht sind, mit Lautsprechern im Tunnel und an den Tunnelportalen auszurüsten, um Verhaltensanweisungen für die Tunnelnutzer im Ereignisfall zu übermitteln.

Aufgrund der derzeit nicht vorgesehenen Videoüberwachung des Tunnels Nord und Süd sind ebenfalls keine Lautsprecher vorgesehen.

#### Orientierungsbeleuchtung

Für die Tunnel ist aufgrund ihrer geringen Länge keine Orientierungsbeleuchtung vorgesehen.

### Fluchtwegkennzeichnung

Um einer flüchtenden Person die Orientierung im Tunnel zu erleichtern, wird in den Tunnelröhren eine Fluchtwegkennzeichnung entsprechend den RABT vorgesehen.

Fluchtwegkennzeichen bestehen aus Fluchtsymbol (zum nächstgelegenen Notausgang hin orientiert) und Pfeilsymbolen je Fluchtrichtung mit darüber angeordneten Entfernungsangaben zu den nächstgelegenen Notausgängen bzw. dem Portal.

### Leiteinrichtungen

Aktive Leiteinrichtungen sind nach den RABT nicht erforderlich.

In Tunneln ab 400 m Länge soll die visuelle Führung durch selbstleuchtende Markierungselemente am linken und rechten Fahrbahnrand verbessert werden. Die Markierungselemente tragen grundsätzlich zu einer Erhöhung der Sicherheit bei, zumal durch diese im Brandfall ein weiterer Orientierungspunkt für den flüchtenden Verkehrsteilnehmer gegeben ist.

### Brandmeldeeinrichtungen

Die Installation von Druckknopfmeldern zur manuellen Brandmeldung ist nach den RABT in den Tunneln nicht erforderlich.

Automatische Brandmeldeeinrichtungen sind in den Tunneln Nord und Süd nach den RABT ebenfalls nicht erforderlich. Automatische Brandmeldeeinrichtungen sollen jedoch in Betriebsräumen mit schützenswerten Anlagen, z. B. elektrischen Anlagen, vorgesehen werden.

Manuelle Brandmeldeeinrichtungen sind in Tunneln mit Längen von  $\geq 400$  m als Handfeuermelder außen an jeder Notrufkabine anzuordnen.

Automatische Brandmeldeeinrichtungen sind ab einer Tunnellänge von 400 m bzw. bei Tunneln mit mechanischer Lüftung vorzusehen.

### Handfeuerlöscher

Nach den RABT ist die Bereitstellung von Handfeuerlöschern nicht erforderlich.

### Löschwasserversorgung

Aufgrund der geplanten Tunnellängen von  $< 400$  m sind gemäß RABT nur in den Portalbereichen (jeder Portalbereich besteht aus 2 Portalen) Löschwasserentnahmestellen vorzusehen.

An den Portalen sind jeweils 1.200 l/min für mindestens eine Stunde oder Behälter mit einem nutzbaren Löschwasservorrat von 72 m<sup>3</sup> bereitzustellen. Der erforderliche Entnahmedruck ist zu gewährleisten. Bei der Standortwahl an den Porta-

len sind potentielle Gefährdungen aufgrund der Rauchausbreitung zu berücksichtigen.

#### Beleuchtung

Die Auslegung der Tunnelbeleuchtung erfolgt nach den Vorgaben der RABT. Die Anforderungen an die Tunnelbeleuchtung sind in der DIN 67524-1 entsprechend dem Stand der Technik festgelegt.

Die Tunnel werden mit einer Adaptations- und Durchfahrtsbeleuchtung ausgerüstet. Die bei Nacht betriebenen Leuchten der Durchfahrtsbeleuchtung fungieren auch als Notbeleuchtung. Diese wird bei Netzausfall unterbrechungsfrei über die USV-Anlage 60 Minuten versorgt.

In den Einfahrtsbereichen der Tunnelröhren dient die Adaptationsbeleuchtung der Anpassung des menschlichen Auges an die geänderten Lichtverhältnisse bei Einfahrt in den Tunnel.

#### Lüftung

Die beiden Tunnel Eisgrub sind aufgrund ihrer Länge von 255 m bzw. 395 m gemäß den Anforderungen der RABT ohne Ventilation konzipiert.

#### Verkehrstechnische Einrichtungen

Mit Hilfe der verkehrstechnischen Einrichtungen soll sowohl im Normalbetrieb als auch bei Störungen und Wartungsarbeiten ein möglichst sicherer Verkehrsablauf gewährleistet werden.

Gemäß den [RABT 2016] ist für die beiden Tunnel mit 255 und 395 m Länge sowie der vorgesehenen Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h eine verkehrstechnische Mindestausstattung erforderlich. Die Mindestausstattung besteht aus den folgenden Einrichtungen:

- Zeichen Tunnel (Z 327 StVO)
- Zeichen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Z 274 StVO)
- Zeichen Überholverbot für Lkw (Z 277 StVO)
- Gefahrenzeichen Lichtzeichenanlage (Z 131 StVO) mit gelbem Blinklicht, das bei Aktivierung der Wechsellichtzeichen (WLZ) eingeschaltet wird
- zweifeldrige WLZ Rot/Gelb am Portal
- Wechselverkehrszeichen (WVZ) (in der Regel Z 250 StVO mit Entfernungsangabe) zur Verdeutlichung der Sperrsituation
- Zeichen Ende sämtlicher Streckenverbote (Z 282 StVO)

Nach den Empfehlungen der [RABT 2016] soll bei Tunneln < 400 m, die aus dem Abstand der Haltesichtweite vor dem Portal über die gesamte Tunnellänge einsehbar sind, auf die Sperranlage bestehend aus Z 131 StVO mit gelbem Blink-

licht, WLZ und WVZ verzichtet werden. Da die Tunnel aufgrund ihrer Trassierungsparameter nicht beide aus dem Abstand der Haltesichtweite vor dem Portal durchgehend einsehbar, werden für beide Tunnel die verkehrstechnischen Einrichtungen zur Sperrung der Tunnel vorgesehen.

In den Tunneln sind derzeit keine Messquerschnitte zur Verkehrsdatenerfassung zur frühzeitigen Erkennung von Stör- und Notfällen vorgesehen (bei Mindestausstattung nicht erforderlich).

Aufgrund der nur 310 m langen freien Strecke zwischen den Tunneln, sind die Tunnel als Tunnelgruppe zu betrachten.

#### Ersatzstromversorgung

Sind die folgenden Einrichtungen vorgesehen, so ist für diese eine unterbrechungsfreie Stromversorgung für eine Betriebszeit von 60 Minuten gemäß den RABT vorzusehen:

- Fluchtwegkennzeichnung, Orientierungsbeleuchtung, Leuchtrahmen um die Notausgänge, Blitzleuchte, Rettungszeichen
- Notbeleuchtung, Rettungswegbeleuchtung, Beleuchtung der Betriebsräume (mindestens eine Leuchte je Raum)
- Leiteinrichtung (Selbstleuchtende Markierungselemente)
- Kommunikationseinrichtungen bestehend aus Funkanlage, Videoanlage, Lautsprecheranlage, Notrufeinrichtungen
- Brandmeldeanlage
- Sicherheitsrelevante Messeinrichtungen
- Verkehrstechnische Einrichtungen im Tunnel und auf den Annäherungsstrecken soweit sie für die Tunnelsperrung erforderlich sind
- Anlagenleit- und Automatisierungsebene, Übertragungstechnik
- Telekommunikationsanlage

## **4.5 Mögliches Gefährdungspotential**

Im Folgenden werden mögliche Gefährdungen, die sich aus der geplanten Trassierung sowie der baulichen und betriebstechnischen Ausstattung der Tunnel ergeben können aufgeführt.

Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau der Tunnel gehen insbesondere aus der geplanten Trassierung mit einer vorgesehenen Längsneigung von 5 % hervor. Diese wirkt sich auf die Rauchausbreitung im Brandfall aus und kann zudem einen Einfluss auf die Unfallrate und das Schadensausmaß von Unfällen im Tunnel haben.

Des Weiteren haben die Lage der Tunnel im Netz und die damit verbundenen Zufahrtsmöglichkeiten zu den Tunnelportalen sowie ggf. vorgesehene Betriebs-

wege, insbesondere bei Stau auf der B 15n, Einfluss auf die Fremdrettung und Brandbekämpfung. Im Ereignisfall verbessern kurze Zugriffszeiten der Einsatzdienste (z. B. Polizei, Feuerwehr und Rettungsdienste) die Möglichkeiten für Hilfeleistung bei Bränden, Unfällen und Pannen sowie deren Wirksamkeit.

Angaben zu geplanten Zufahrtsmöglichkeiten zu den Tunnelportalen und zu vorgesehenen Betriebswegen liegen derzeit nicht vor.

Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau der Tunnel können aus der Querschnittswahl ohne Seitenstreifen hervorgehen. Ein Seitenstreifen begünstigt im Tunnel i. d. R. das Bilden einer Rettungsgasse im Ereignisfall und dient einem sicheren Abstellen von Pannenfahrzeugen. Aufgrund der 2-streifigen Verkehrsführung durch die Tunnel ohne Seitenstreifen ist im Ereignisfall das Bilden einer Rettungsgasse, die den Einsatzdiensten eine schnelle Zufahrt zum Ereignisort ermöglicht, erschwert. Bei Stau reicht insbesondere in den Tunnelröhren die Fahrbahnbreite von 7,50 m nicht zwingend aus, um ein Vorbeifahren von Einsatzfahrzeugen zu gewährleisten.

Die vorliegende Quer- und Längsneigung der Fahrbahn beeinflussen die Ableitung von anfallenden Wässern. Bei unzureichendem Gefälle zu den Entwässerungseinrichtungen kann die Sicherheit negativ beeinflusst werden. Die Auswirkungen der im Verlauf des Tunnels reduzierten Querneigung ( $\leq 2,5\%$ ) sowie des vorliegenden Querneigungswechsels im unmittelbaren Bereich des Südportals des Tunnels Nord sind daher hinsichtlich der Fahrbahntwässerung näher zu betrachten.

Gefährdungen der Tunnelnutzer infolge der betriebstechnischen Ausstattung liegen bei Umsetzung der Empfehlungen der RABT nicht vor.

#### **4.6 Verkehrsaufkommen**

In den Tunneln, auf der Zwischenstrecke und auf den unmittelbaren Zufahrtstrecken nach dem Geschwindigkeitstrichter ist eine max. zul. Geschwindigkeit von 80 km/h vorgesehen.

##### Durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV)

Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen an Werktagen wird in der Verkehrsuntersuchung vom 22.09.2015 [VU 2015] im Jahr 2030 auf **19.300 Kfz/d** prognostiziert (siehe Abbildung 5).

Verkehrsuntersuchung B 15neu

ROK 6

Raum Landshut, Fall 1c  
B 15neu 3-streifig im  
Raumordnungskorridor  
Verkehr Werktag 2030  
in 1000 Kfz/24 Std.

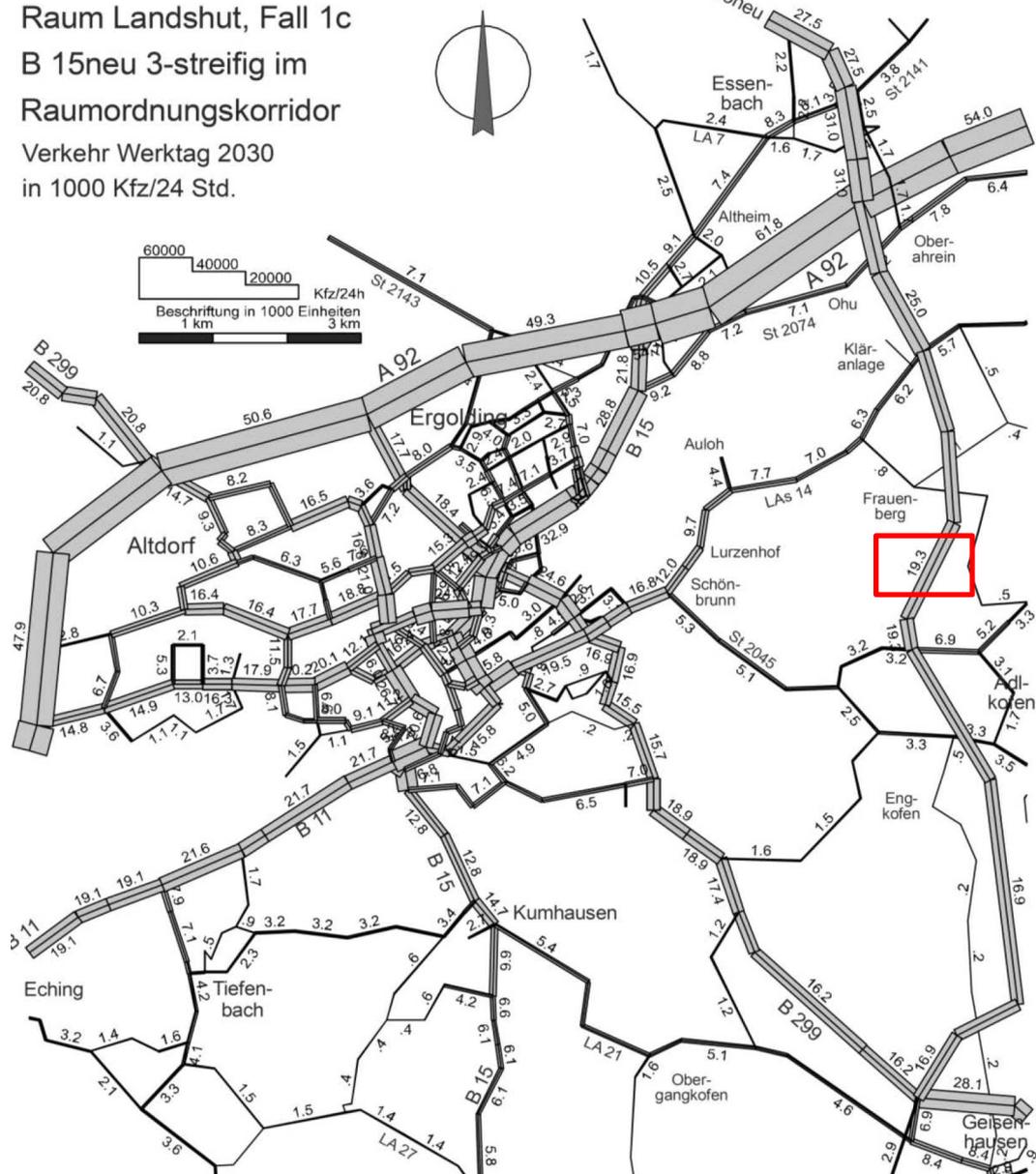


Abbildung 5: Verkehrsbelastung bei 3-streifiger Weiterführung der B 15neu auf einer Trasse im ROK [VU 2015]

### Schwerverkehrsaufkommen

Zur prognostizierten Schwerverkehrsbelastung im Jahr 2030 liegen keine Angaben vor. Diese wird daher nachfolgend abgeschätzt.

Im Juni 2016 wurde an 6 Werktagen im Auftrag der Autobahndirektion Süd eine Verkehrszählung an der B 299 und der B 15 im Raum Landshut durchgeführt. Gezählt wurden alle Fahrzeuge des Schwerverkehrs (Lkw >3,5 t, Lastzug, Bus). Zusätzlich wurden alle Gefahrguttransporte detailliert erfasst. Gezählt wurde jeweils von 5.00 bis 22.00 Uhr an den folgenden zwei Stellen:

- Zählstelle 1: B 299 Konrad-Adenauer-Str., südl. der Dekan-Simbürger-Str. in Landshut
- Zählstelle 2: B 15 Rosenheimer Str., südlich des Kreisverkehrs LA 21 in Kumhausen

Die folgenden Ergebnisse sind im Gutachten zur Verkehrszählung [VZ 2016] dokumentiert:

An der Zählstelle 1 fahren an Normalwerktagen pro Tag rund 2.300 bis 2.500 Schwerverkehrsfahrzeuge auf der B 299 über die Isar. Die Richtungsbelastungen sind dabei annähernd gleich.

Die B 15 ist an der Zählstelle 2 südlich von Kumhausen an Normalwerktagen mit rund 800 bis 900 Schwerverkehrsfahrzeugen belastet.

Da im Rahmen der Zählung im Juni 2016 keine Erfassung des Gesamtverkehrs erfolgte, werden die SV-Anteile an der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke an Werktagen (DTV<sub>w</sub>) unter Ansatz des an diesen Stellen in der Verkehrsuntersuchung (Teil A, Analyse 2014) [VU 2015] ermittelten DTV<sub>w</sub> abgeschätzt:

- Zählstelle 1: 2.300 bis 2.500 Lkw bezogen auf 29.200 Kfz/d entsprechen einem SV-Anteil am DTV<sub>w</sub> von 7,9 bis 8,6 %
- Zählstelle 2: 800 bis 900 Lkw bezogen auf 11.800 Kfz/d entsprechen einem SV-Anteil am DTV<sub>w</sub> von 6,8 bis 7,6 %

In der Verkehrsuntersuchung [VU 2015], Teil A werden einzelne SV-Anteile der Jahre 2001 und 2014 für die B 15 und B 299 aufgeführt. Diese liegen im Jahr 2014 zwischen 15,1 % und 19,3 % (siehe Abbildung 6).

Querschnitt	Gesamtverkehr			Schwerverkehr		
	2001	2014		2001	2014	
B 15 Martinshausen	11.100	16.600	+50 %	1.600	3.210	+100 %
LA 10 Ri. Postau	2.500	3.800	+52 %	420	870	+107 %
B 15 südl. LA 10	10.300	14.600	+42 %	1.380	2.540	+84 %
B 299 westl. Geisenhausen	14.600	17.300	+18 %	1.560	2.620	+68 %
B 299 östl. Geisenhausen	12.800	17.100	+33 %	1.520	2.660	+75 %

Abbildung 6: Verkehrszunahmen durch die bisher fertiggestellte B 15neu, Angaben in Kfz/d, Werktagsverkehr [VU 2015]

Unter Berücksichtigung dieser Werte ist davon auszugehen, dass die auf Basis der Verkehrszählung im Juni 2016 ermittelten SV-Anteile zwischen 6,8 und 8,6 % nicht das zu erwartende SV-Aufkommen der zu betrachtenden Tunnelstrecke/Umfahrungsstrecke abbilden.

Daher wird das im Jahr 2030 zu erwartende SV-Aufkommen auf der B 15n auf Basis des von Prof. Kurzak in [VU 2015] aufgeführten Schwerverkehrs abgeschätzt.

Die Zunahme des Schwerverkehrsaufkommens bis 2030 wird dabei in Anlehnung an den verzeichneten Trend von 2001 bis 2014 abgeschätzt. In diesen 13 Jahren wird eine Zunahme des Schwerverkehrsanteils für die vier Querschnitte der B 15 und B 299 zwischen 3,7 und 4,9 % (im Mittel ca. 4,25 %) aufgeführt. Der SV-Anteil bewegt sich im Jahr 2014 zwischen 15,1 und 19,3 %.

Geht man von einer Zunahme des SV-Anteils von 2014 bis 2030, also innerhalb von 16 Jahren, von einer weiteren Steigung um rund 5 % aus, so gelangt man zu einem SV-Anteil zwischen 20,1 und 24,3 %.

Im Rahmen der Risikoanalyse wird auf Basis dieser Abschätzung die Annahme getroffen, dass im Jahr 2030 bei einer  $DTV_w$  Belastung von 19.300 Kfz/d ein SV-Anteil am  $DTV_w$  von **20 %** vorliegt und somit 3.860 Lkw/d die Tunnel an Werktagen passieren.

Der Busanteil am Schwerverkehr wird gemäß [FE ADR 2009] mit **5 %** angenommen.

#### Gefahrgutaufkommen

Die übermittelte Gefahrgutzählung an den 6 Zähltagen (Werktagverkehr) im Juni 2016 [VZ 2016] im Auftrag der Autobahndirektion Süd ergibt folgendes Aufkommen:

- An der Zählstelle 1 nutzen an Werktagen 170 bis 200 Gefahrguttransporte die B 299 in Landshut. Der Anteil der Gefahrgutfahrzeuge am gesamten Schwerverkehr beträgt dabei je nach Werktag zwischen 7,2 und 10,3 %.
- Die B 15 ist an der Zählstelle 2 mit 10 bis 20 Gefahrgutfahrzeugen pro Tag im Vergleich zur B 299 sehr gering belastet. Der Anteil des Gefahrgutverkehrs am gesamten Schwerverkehr beträgt je nach Werktag zwischen 1,2 und 2,8 %.

Bei der Erfassung wurden die Fahrzeuge, die mit einer „Gefahrentafel“ (orange-farbene Warntafel, rechteckig, am Transportfahrzeug) nach Fahrzeugart, Aufbau und transportiertem Gefahrgut unterschieden. Bei den Gefahrentafeln wurde jeweils Gefahrunummer und Stoffnummer (UN-Nr.) sowie die dazugehörigen Gefahrezettel notiert. Fahrzeuge mit leeren Gefahrentafeln wurden ebenso erfasst.

Die insgesamt erfassten Gefahrguttransporte der beiden Zählstellen sind in Abbildung 7 aufgeführt.

Gefahrnr.	Stoffnr.	Gefahrgut	Anzahl Fahrzeuge	%
22	1977	Stickstoff tiefgekühlt	43	4
22	2187	Kohlendioxid, tiefgekühlt	5	1
23	1965	Flüssiggas	16	2
30	1123	Butylacetate	3	0
30	1202	Diesel / Heizöl	343	33
30	1863	Düsenkraftstoff	10	1
30	1993	Entzündbarer flüssiger Stoff	1	0
30	3256	Erwärmter flüssiger Stoff	1	0
33	1170	Ethanol	1	0
33	1203	Benzin	298	29
33	1220	Isopropylacetat	1	0
33	1231	Methylacetat	1	0
40	1361	Kohle / Ruß	3	0
44	2448	Schwefel geschmolzen	13	1
58	2014	Wasserstoffperoxid	1	0
60	3428	3-chlor-4-Methylphenylisocyanat	1	0
80	1789	Chlorwasserstoffsäure	9	1
80	1824	Natriumhydroxidlösung	12	1
X80	1827	Zinntetrachlorid	1	0
80	1830	Schwefelsäure	7	1
80	1832	Schwefelsäure gebraucht	2	0
80	2209	Formaldehydlösung	3	0
80	2581	Aluminiumchlorid	4	1
80	2586	Alkylsulfonsäuren	1	0
80	2672	Ammoniaklösung	1	0
80	3264	Ätzender saurer anorg. flüss. Stoff	1	0
80	3267	Ätzender basischer org. flüss. Stoff	2	0
85	2031	Salpetersäure	1	0
90	3082	Umweltgefährdender Stoff flüssig	9	1
99	3257	Erwärmter flüssiger Stoff	142	14
225	1073	Sauerstoff tiefgekühlt	3	0
Leer	Leer		102	10
<b>Summe</b>			<b>1041</b>	<b>100</b>

Abbildung 7: Transportiertes Gefahrgut (beide Zählstellen, alle Zähltage) [VZ 2016]

Im Rahmen der Risikoanalyse wird im Jahr 2030 der GG-Anteil am Schwerverkehr mit 6 % abgeschätzt. Dieser Wert entspricht dem durchschnittlichen Gefahrgutaufkommen auf Bundesfernstraßen gemäß [FE ADR 2009] und basiert auf einer umfangreicheren Datenbasis.

Bei den erfassten Gefahrguttransportern handelt es sich überwiegend um Tanklastzüge mit Benzin oder Diesel/Heizöl (62 % aller Gefahrguttransporte), die der Gefahrgutklasse 3 zugeordnet sind. Dies entspricht auch der üblichen Verteilung des Gefahrgutaufkommens auf deutschen Straßen.

Weitere 14 % der Transporte trugen die Gefahren tafel 99/3257 (erwärmter flüssiger Stoff, Gefahrgutklasse 9).

Bei 10 % der Gefahrguttransporte waren die Gefahren tafeln leer. Leere Tafeln werden verwendet, wenn Gefahrgüter als Versandstücke (verpackte Güter) zusammen transportiert werden. Die restlichen 14 % entfielen auf sonstige Gefahrstoffe.

Die Transporte der Klasse 2 (Gefahrennummer 22, 23 und 225) liegen bei nur ca. 6,0 %. Die Klasse 1 war im Erhebungszeitraum gar nicht vorhanden.

Für die Kategorisierung der Tunnel werden daher auf der sicheren Seite liegend auch Transporte für die Klassen 1 und 2 nach den Standardwerten berücksichtigt.

Da bezüglich der Verkehrsverteilung in den Tag- und Nachtstunden keine Prognosewerte vorliegen, wird in Anlehnung an die im Forschungsbericht [FE ADR 2009] genannten durchschnittlichen Verkehrsdaten für Deutschland davon ausgegangen, dass zwischen 06:00 und 21:00 Uhr eine Belastung von  $1,3 \times \text{DTV} / 24 \text{ h}$  (1.045 Kfz/h, entsprechen 81,25 % des Gesamtverkehrsaufkommens) vorliegt. In den Nachtstunden von 21:00 bis 06:00 Uhr wird ein Aufkommen von  $0,5 \times \text{DTV} / 24 \text{ h}$  (402 Kfz/h, entsprechen 18,75 % des Gesamtverkehrsaufkommens) angenommen.

## 4.7 Unfallkennzahlen

Aufgrund der geplanten Längsneigung von 5 % werden für die Tunnel Eisgrub spezifische Unfallkennzahlen abgeleitet. Mit Hilfe dieser werden in der quantitative Risikoanalyse die Schadensausmaße bei Unfällen ohne Fahrzeugbrand berechnet. Zur Herleitung werden vorhandene Statistiken und weiterführende Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben herangezogen.

### 4.7.1 Unfallrate

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ FE 03.378/2004/FRB dienten Unfalldaten der Jahre 2002-2004 für 80 Autobahn- und Landstraßentunnel als Grundlage für die Herleitung der statistischen Eingangsgrößen zur Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur risikoorientierten Sicherheitsbeurteilung von Straßentunneln.

Im zugehörigen Forschungsbericht [SB FE 2009] ist beschrieben, dass mit der Analyse der Unfallanzeigen die folgenden Einflussgrößen auf das Unfallgeschehen als maßgeblich ermittelt werden konnten:

- Betriebsart (Gegenverkehr/Richtungsverkehr)
- Tunnellänge
- Verkehrsaufkommen (DTV)
- Vorliegen von Zu- und Abfahrten im Tunnel

In Abhängigkeit der Tunnelcharakteristika wurden statistische Basiswerte für die Bestimmung der jährlichen Kollisionshäufigkeiten ermittelt. Die abgeleiteten Unfallraten für Richtungsverkehrstunnel sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Korrigierte Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel	
Tunnel mit Zu-/Abfahrten	Tunnel ohne Zu-/ Abfahrten
$5.28 \cdot 10^{-7} [1/(Fzg \cdot km)]$	$2.28 \cdot 10^{-7} [1/(Fzg \cdot km)]$

Tabelle 2: Korrigierte Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel [SB FE 2009]

Die Initialhäufigkeit einer Kollision für eine Tunnelröhre kann gemäß folgender Formel ermittelt werden:

$$H_{Kol} = \alpha \cdot L \cdot DTV_{Röhre} \cdot 365$$

mit:

$H_{Kol}$ : Häufigkeit einer Kollision in der betrachteten Tunnelröhre [1/Jahr]

$\alpha$ : Statistisch korrigierte Unfallrate [1/(Fzg\*km)]

$DTV_{Röhre}$ : Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen je Röhre [Fzg/Tag]

L: Länge der untersuchten Tunnelröhre [km]

Die Einflüsse der Gefälleverhältnisse, der zulässigen bzw. tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit sowie von Pannenbuchten und/oder Seitenstreifen auf die Unfallrate konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens auf Basis der vorliegenden Grundlagendaten nicht statistisch nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken“ (FE 02.0333/2011/EGB) [SB EEA 2014] wurden für insgesamt 82 Röhren von Richtungsverkehrstunnel die Unfalldaten analysiert und vergleichend gegenübergestellt. Die Tunnel wurden entsprechend ihrer Merkmale (z. B. Fahrstreifenanzahl, Seitenstreifen, Ein- und Ausfahrten, zulässige Höchstgeschwindigkeit) in Gruppen unterteilt.

Zur Untersuchung der Verkehrssicherheit wurde eine makroskopische Unfallanalyse durchgeführt. Ein Vergleich der Unfallkenngrößen einzelner Teilkollektive führte u. a. zu folgenden Ergebnissen für Tunnel ohne Ein- und Ausfahrten:

- 2-streifige Querschnitte ohne Seitenstreifen weisen eine geringfügig niedrigere mittlere Unfallrate bei  $V_{zul} = 80$  km/h als bei  $V_{zul} = 100$  km/h auf.
- 2- und 3-streifige Querschnitte mit und ohne Seitenstreifen weisen eine doppelt so hohe Anzahl an Unfällen der Kategorien 1 bis 3 bei  $V_{zul} = 100$  km/h als bei  $V_{zul} = 80$  km/h auf.
- 2-streifige Querschnitte mit Seitenstreifen weisen eine niedrigere mittlere Unfallrate als ohne Seitenstreifen bei  $V_{zul} = 80$  km/h auf.

Bei einer Reduzierung der Geschwindigkeit von 100 auf 80 km/h kann demnach von einer Reduzierung der Unfallrate ausgegangen werden. Zudem kann die Anordnung von Seitenstreifen zur Senkung der Unfallrate und der mittleren Unfallkostenrate bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten beitragen.

Eine Auswertung der Unfalldaten bezüglich der in den Tunneln vorliegenden Längsneigungen erfolgte im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht.

#### Unfallrate bei zul. Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und 5 % Längsneigung

Eine hohe Längsneigung nimmt grundsätzlich Einfluss auf das Verkehrsgeschehen in einem Tunnel. Betrachtet man die im Forschungsbericht [SB FE 2009] aufgeführten Unfallraten der Richtungsverkehrstunnel mit max. Längsneigungen von  $\geq 4,0\%$  und 2 Fahrstreifen (A 8 Tunnel Pelling Berg, A 46 Tunnel Hemberg, A 81 Tunnel Heilsberg), liegen diese nicht über der im Rahmen des Forschungsvorhabens ermittelten mittleren Unfallrate des entsprechenden Tunneltyps.

Für den Tunnel Pelling Berg beträgt die Unfallrate für die Jahre 2002 bis 2004 z. B. 1,17 Unfälle pro  $10^7$  Fahrzeugkilometer, für den Tunnel Hemberg wurden 2,0 Unfälle pro  $10^7$  Fahrzeugkilometer ermittelt. Die mittlere Unfallrate für vergleichbare Tunnel ohne Einfluss von Zu- und Abfahrten beträgt 2,28 Unfälle pro  $10^7$  Fahrzeugkilometer.

Diese Datengrundlage ist aufgrund des kurzen betrachteten Zeitraumes von drei Jahren und der geringen Anzahl an Unfällen zur Herleitung einer repräsentativen Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel mit Längsneigungen von 5 % nicht statistisch abgesichert. Zudem nehmen bei erhöhten Längsneigungen weitere Einflussfaktoren, wie z. B. der SV-Anteil, Einfluss auf das Unfallgeschehen.

Daher wird die im Forschungsvorhaben [SB FE 2009] vorgenommene Unfallauswertung von 53 Richtungsverkehrstunneln und die daraus ermittelte Unfallrate, die somit auf einer breiten Datenbasis vergleichbarer Tunnel abgestützt ist, als Basis genommen und der Einfluss der Längsneigung auf das Unfallgeschehen zusätzlich abgeschätzt.

Zur Berücksichtigung der in den Tunneln Eisgrub vorliegenden Längsneigung von 5 % wird der Standardwert für die jährlichen Kollisionshäufigkeit für die Gefälle- und Steigungsstrecke um 20 % auf  $2,74 \cdot 10^{-7}$  [ $1/(Fzg \cdot km)$ ] angehoben.

#### Unfallrate bei zul. Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h, Geschwindigkeitsüberwachung und 5 % Längsneigung

Eine Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h auf 60 km/h und die Überwachung der gefahrenen Geschwindigkeiten wirken sich positiv auf die zu erwartende Häufigkeit von Unfällen mit und ohne Brandereignissen aus.

Der erhöhten Kollisionsgefahr infolge der Längsneigung kann durch die Geschwindigkeitsreduzierung/-überwachung entgegengewirkt werden. Für diesen Untersuchungsfall wird daher auf den Literaturwert der Unfallrate aus

[SB FE 2009] für Richtungsverkehrstunnel in Höhe von  $2,28 \cdot 10^{-7}$  [1/(Fzg\*km)] pro Jahr zurückgegriffen.

Unfallrate bei zul. Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und 3 % Längsneigung

Auf Basis von [SB FE 2009] wird für den Referenzstunnel der Standardwert der Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel ohne Einfluss von Zu- und Abfahrten von  $2,28 \cdot 10^{-7}$  [1/(Fzg\*km)] pro Jahr angenommen.

**4.7.2 Verteilung der Unfalltypen**

Der Unfalltyp gibt Aufschluss über den Verkehrsvorgang der zur Entstehung des Unfalls geführt hat. Der Unfalltyp wird als dreistelliger Zahlencode angegeben. Dabei beschreibt die erste Ziffer den Grundtypen, während die folgenden beiden Ziffern eine detaillierte Aufschlüsselung der Konfliktsituation ermöglichen. Es werden die in Tabelle 3 aufgeführten Grundtypen unterschieden.

Unfalltypen	
1	Fahrunfall
2	Abbiege-Unfall
3	Einbiegen / Kreuzen-Unfall
4	Überschreiten-Unfall
5	Unfall durch ruhenden Verkehr
6	Unfall im Längsverkehr
7	Sonstiger Unfall

Tabelle 3: Unfalltypen

Neben den Unfallraten konnte im Rahmen des Forschungsvorhaben [SB FE 2009] die in Tabelle 4 aufgeführte Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Unfalltyps für Richtungsverkehrstunnel ohne Einfluss von Zu- und Abfahrten über die Unfallauswertung abgeleitet werden.

Verteilung der Unfalltypen gemäß [SB FE 2009]				
Richtungsverkehrstunnel ohne Zu-/Abfahrt	Unfalltyp 1	Unfalltyp 3	Unfalltyp 6	Unfalltyp 7
< 600 m	46.2%	0.0%	23.1%	30.8%
600 - 1.200 m	24.4%	0.0%	56.1%	19.5%
≥ 1.200 m	12.8%	0.0%	78.5%	8.7%

Tabelle 4: Verteilung der Unfalltypen [SB FE 2009]

In Tunnelstrecken ohne Zu- und Abfahrten sind demnach im Wesentlichen die Unfalltypen Fahrunfall (Unfalltyp 1), Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6) und sonstiger Unfall (Unfalltyp 7) von Bedeutung. Der Unfall im Längsverkehr ist insbesondere bei längeren Tunnelstrecken der dominierende Unfalltyp.

Der Unfalltyp 1 umfasst Selbstunfälle, wie z. B. Kollisionen mit der Tunnelinfrastruktur. Dem Unfalltyp 6 werden z. B. Auffahrkollisionen oder Kollisionen beim Fahrstreifenwechsel während eines Überholvorgangs zugeordnet.

Analog zur Kollisionshäufigkeit konnte auch hier nur der Einfluss der Verkehrsart, der Tunnellänge und der Zu- und/oder Abfahrten auf die Verteilung der Unfalltypen ausgewiesen werden. Die Unfalltypenverteilung in Anhängigkeit weiterer Faktoren, wie der Längsneigung, war auf Basis der vorliegenden Grundlagendaten nicht aufzuschlüsseln.

#### Einfluss der Längsneigung auf Ereignishäufigkeit von Kollisionen

Die Trassierung der Tunnel im Zuge der B 15n erfolgt mit einer tatsächlichen Längsneigung von bis zu 5 %. Nördlich der zu betrachtenden Tunnel weist die Gradientenlinie eine Wanne mit dem Tiefpunkt bei Bau-km 49+810 auf. Betrachtet man die Steigungsstrecke in Fahrtrichtung Süden, so liegt der Tiefpunkt bzw. Beginn der Steigungsstrecke rund 1.270 m vor Einfahrt in den Tunnel Nord bei Bau-km 51+080. Der Beginn der tatsächlichen Längsneigung von 5 % liegt rund 800 m hinter dem Tiefpunkt. Diese wird über eine Länge von 1.162 m (Bau-km 50+610 bis 51+772) beibehalten. Ab Bau-km 51+772 beginnt die anschließende Kuppenausrundung (siehe Abbildung 3). Im Bereich des Südportals des Tunnels Süd liegt noch eine tatsächliche Längsneigung von ca. 3,1 % vor.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen 2015 [HBS 2015] werden die Besonderheiten des Verkehrsablaufs in Tunneln im Zuge zweistreifiger und vierstreifiger Straßen im Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität auf Strecken von Landstraßen separat berücksichtigt. Im [HBS 2015] wird dabei davon ausgegangen, dass Tunnel in der Regel zügig trassiert sind und eine geringe Längsneigung aufweisen. Den Krümmungsverhältnissen als auch einer Längsneigung wird daher bei Tunneln nur ein sehr geringer Einfluss auf die mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten unterstellt. Auch der Einfluss des Schwerverkehrs bleibt hier unberücksichtigt, da dieser im Tunnel auf Grund der beschränkten zulässigen Höchstgeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf die mittleren Pkw-Fahrtgeschwindigkeiten hat.

Bei der Bewertung der freien Strecke wird hingegen das Maß als auch die Länge der Steigung bzw. des Gefälles im Verfahren zur Bewertung der Verkehrsqualität berücksichtigt. Der Einfluss des Schwerverkehrs auf die Verkehrsqualität fließt über den bemessungsrelevanten SV-Anteil in das Verfahren ein, da bei großen Längsneigungen sich die Geschwindigkeiten insbesondere des Schwerverkehrs reduzieren.

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS 2009] ist veranschaulicht aufgeführt, dass bereits nach einer Steigungslänge von 1.200 m mit 5 % Längsneigung die tatsächliche Geschwindigkeit für ein Bemessungs-

Schwerfahrzeug bei einer gefahrenen Geschwindigkeit von 80 km/h auf 35 km/h absinkt. Geht man von einer Steigungsstrecke mit 3 % aus, so sinkt die Geschwindigkeit bei einer Steigungslänge von 1.200 m lediglich auf ca. 58 km/h (siehe Abbildung 8).

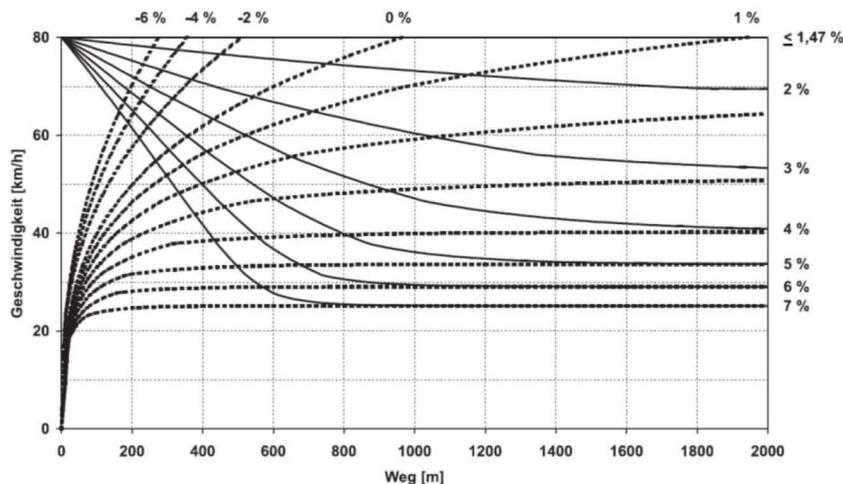


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil für das Bemessungsschwerfahrzeug bei unterschiedlichen Längsneigungen [HBS 2009]

Eine erhöhte Längsneigung kann sich auf die Unfallhäufigkeit negativ auswirken. Dies ist insbesondere bei sehr langen Steigungsstrecken in Zusammenhang mit einem hohen Schwerverkehrsanteil der Fall. Mit zunehmender Steigung und Länge der Strecke reduzieren sich die Reisegeschwindigkeiten aller Fahrzeuge, jedoch vornehmlich die des Schwerverkehrs.

Durch die Differenzgeschwindigkeit zwischen Pkw und Lkw kann es grundsätzlich zu vermehrten Auffahrunfällen bzw. Unfällen durch ausscherende Fahrzeuge (Unfalltyp 6) kommen.

In Gefällebereichen führt eine zunehmende Längsneigung dagegen zu einem erhöhten Geschwindigkeitsprofil aller fahrenden Fahrzeuge. Dazu nimmt insbesondere bei schweren Fahrzeugen der Bremsweg mit dem Gefälle zu. Dies kann grundsätzlich zu einer erhöhten Kollisionshäufigkeit bei Fahrunfällen (Unfalltyp 1) durch Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug führen. Weiterhin kann ein Aufprall auf Hindernisse (Unfalltyp 7) durch den verlängerten Bremsweg leicht vermehrt vorkommen.

Aufgrund der vorliegenden Trassierung im Höhenplan ist davon auszugehen, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten des Schwerverkehrs in Fahrtrichtung Süd im Bereich des Tunnels Nord stark abnehmen und der Schwerverkehr den Tunnel Süd mit geringer Geschwindigkeit durchfährt. Für die Tunnel Eisgrub wird daher der maximalen Steigung von 5 % ein relevanter Einfluss auf die Kollisionshäufigkeit zugeschrieben. Insbesondere bei Überschreitungen der zulässigen

Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h ist mit Gefährdungen infolge der auftretenden Differenzgeschwindigkeiten zu rechnen.

In Fahrrichtung Nord wird der Einfluss der Geschwindigkeitserhöhung infolge des Gefälles auf die Häufigkeit von Kollisionen als etwas geringer eingestuft. Vorauszusetzen ist dabei jedoch die Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h.

Eine Datengrundlage zur Herleitung einer repräsentativen Verteilung der Unfalltypen bei erhöhter Längsneigung liegt nicht vor. Aus diesem Grund wird die im Forschungsbericht [SB FE 2009] aufgeführte Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Unfalltyps für Richtungsverkehrstunnel < 600 m ohne den Einfluss von Zu- und Abfahrten als Grundlage der Unfalltypenverteilung in den Tunneln Eisgrub verwendet.

Unter Berücksichtigung der sich innerhalb des Tunnels ergebenden Veränderungen im Verkehrsfluss aufgrund der Längsneigung wird für die Gefälle- und Steigungsstrecke der angenommene Anstieg der Unfallrate dem Unfalltyp 1 und 6 zugeschrieben. Dies ergibt die in Tabelle 5 aufgeführte bedingte Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Unfalltyps, welche zur Bewertung der Tunnel Eisgrub herangezogen wird.

Verteilung der Unfalltypen [1/(Fzg*km)]				
	Unfalltyp 1	Unfalltyp 6	Unfalltyp 7	Summe
Unfallrate nach [SB FE 2009]	$1,05 \cdot 10^{-7}$ (46.2%)	$0,53 \cdot 10^{-7}$ (23.1%)	$0,70 \cdot 10^{-7}$ (30.8%)	$2,28 \cdot 10^{-7}$ (100%)
zusätzliche Unfälle infolge 5 % LN	$20\% \cdot 0,5 \cdot 2,28 \cdot 10^{-7}$ $= 0,23 \cdot 10^{-7}$ (50%)	$20\% \cdot 0,5 \cdot 2,28 \cdot 10^{-7}$ $= 0,23 \cdot 10^{-7}$ (50%)	-	$0,46 \cdot 10^{-7}$ (100%)
Unfallrate Tunnel Eisgrub	$1,28 \cdot 10^{-7}$ (46,7%)	$0,76 \cdot 10^{-7}$ (27,7%)	$0,70 \cdot 10^{-7}$ (25,6%)	$2,74 \cdot 10^{-7}$ (100%)

Tabelle 5: Verteilung der Unfalltypen Tunnel Eisgrub

## **4.8 Analyse von Gefährdungsszenarien**

### **4.8.1 Zielsetzung und Abgrenzung**

Zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials und Eingrenzung des notwendigen Untersuchungsaufwandes der nachfolgenden qualitativen Risikoanalyse wird eine erweiterte Gefahrenanalyse durchgeführt. Im Rahmen der Gefahrenanalyse werden die grundsätzlichen Gefahren für die Tunnelnutzer, die sich durch den Betrieb der geplanten Tunnels ergeben, abgeleitet. Zudem wird für in Betracht kommende Szenarien eine qualitative Gefahrenabschätzung durchgeführt, mit dem Ziel, die für die Sicherheit maßgeblich relevanten Szenarien und Einflussfaktoren abzuleiten, die in einer vertiefenden Analyse genauer betrachtet werden. Dazu werden mögliche Gefährdungen hinsichtlich der Schadensindikatoren Personen- und Sachschäden beurteilt. Eine Berücksichtigung von Ausfallzeiten, Wegzeiten bei Umfahrung der Tunnel und daraus folgende Kosten sind nicht Teil der Untersuchung.

### **4.8.2 Methodik und Vorgehen**

Im Folgenden werden aus einer Vielzahl möglicher Gefährdungen unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Merkmale relevante Gefährdungsszenarien identifiziert, die in der weiterführenden Risikoanalyse vertieft betrachtet werden. Die Analyse wird in den folgenden drei Schritten durchgeführt:

1. In einem ersten Schritt werden die möglichen Gefährdungen, die sich beim Betrieb der Tunnel ergeben zusammengestellt. Dabei werden passive Gefährdungen (PG), die sich aus verkehrlichen, technischen und organisatorischen Gefahren bzw. Naturgefahren ergeben und aktive Gefährdungen (AG), die sich aus Sachbeschädigungen und anderen Delikten ergeben, unterscheiden. Jeder Gefährdung werden Hauptszenarien zugeordnet, die im weiteren Vorgehen beurteilt werden.
2. Durch einen qualifizierten Ausschluss von Hauptszenarien, die für die betrachteten Tunnel nicht relevant sind oder als Eingangsszenarien ursächlich für andere Hauptszenarien sind, wird die Anzahl der im Weiteren zu untersuchenden Szenarien eingeschränkt. Zur Beurteilung der Relevanz dienen eine grobe Einschätzung von Häufigkeit und Ausmaß von Personen- und Sachschäden.
3. Hauptszenarien, deren Risiko im Rahmen des qualifizierten Ausschlusses als relevant eingestuft wurde, werden im abschließenden Schritt der Gefahrenanalyse näher betrachtet. Dabei wird jedes Hauptszenario in ausführlichen Gefahrenblättern analysiert. Ausgehend von einem Referenzszenario werden dabei die folgenden Punkte betrachtet bzw. beurteilt:

- Mögliche Großereignisse und erschwerende Umstände (Worst case Szenarien)
- Ursachen und Auslöser für das jeweilige Szenario
- Mögliche resultierende Schäden (Schadensindikatoren Personen- und Sachschäden)
- Sicherheitsrelevante Aspekte, die in Form von geplanten Maßnahmen einer Begrenzung von Schadenshäufigkeit bzw. -ausmaß dienen.  
Hier werden zusätzlich erste mögliche weitere Maßnahmen genannt, die über die aktuell geplante Ausstattung hinausgehen.
- Grobe risikobasierte Bewertung, inwiefern im Hinblick auf Häufigkeit, Relevanz und der bereits geplanten Sicherheitsmaßnahmen unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Merkmale das betrachtete Hauptszenario weiter zu untersuchen ist.
- Fazit, ob das Hauptszenario in der weiterführenden Risikoanalyse untersucht wird.

### 4.8.3 Gefährdungsmatrix

In der folgenden Gefährdungsmatrix (Tabelle 6) werden die möglichen Gefährdungen zusammengestellt und ihre Relevanz auf die Gefährdung der Tunnelnutzer qualitativ abgeschätzt. Dabei wird zwischen passiven und aktiven Gefährdungen unterschieden, denen jeweils Hauptszenarien zugeordnet sind.

Für die nachfolgende Risikoanalyse werden einige Hauptszenarien ausgeschlossen. Erläuterungen dazu sind im Anschluss an die Tabelle in Kapitel 4.8.4 aufgeführt. In Kapitel 4.9 erfolgt die Betrachtung der als relevant identifizierten Gefährdungen.

Art der Gefährdung		Hauptszenario	Relevanz	
passive Gefährdung (PG)	Ereignisse im Tunnel (Verkehr)	Panne	PG_Panne	
		Kollision ohne Brand	PG_Kollision	
		Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)	PG_Brand	
		Freisetzung von Gefahrgütern gemäß ADR	PG_Gefahrgut	
		Hindernis (Ladung/Fußgänger/Radfahrer/Tiere etc.)	PG_Hindernis	
		Geisterfahrer	a)	
	Ereignisse im Tunnel (Technik/Infrastruktur)	Ausfall Belüftung	b)	
		Ausfall Beleuchtung	b)	
		Ausfall Sicherheitseinrichtung	b)	
		Ausfall der Hauptenergieversorgung	b)	
	Ereignisse außerhalb des Tunnels (Ver- kehr/Technik)	Stau auf freier Strecke, Rückstau in Tunnel		PG_Stau
		Vorfall im vorgelagertem Tunnel	c)	
	Ereignisse außerhalb des Tunnels (Naturgefahren)	Starkniederschlag (Regen, Schnee, Hagel)	d)	
		Luftfeuchtigkeit im Tunnel	e)	
		Sturm	f)	
		Blitzschlag	g)	
		Erdbeben	h)	
		sonst. Naturgefahren	i)	
	Organisation / Betrieb / Wartung	Arbeitsunfall	j)	
		kein Regelbetrieb des Tunnels		PG_Betrieb
Bedien- und Kommunikationsfehler		k)		
Verfügbarkeit Ereignisdienste		l)		
Mangelhafte Erhaltung und Betrieb		m)		
aktive Gefährdung (AG)	Sachbeschädigung / Delikte	Brandstiftung	n)	
		Sabotage	n)	
		Vandalismus	n)	
		Selbstschädigung/Suizid	o)	
Legende:				
 keine relevante Gefährdung oder Eingangsszenario ursächlich für andere Hauptszenarien → Erläuterung in Abschnitt 4.8.4				
 relevante Gefährdung → weitere Betrachtung in Abschnitt 4.9				

Tabelle 6: Übersicht der möglichen Gefährdungen und ihrer Hauptszenarien

#### 4.8.4 Ausschluss von Szenarien - Erläuterungen zur Gefährdungsmatrix

##### a) Geisterfahrer

Die Gefahr eines Geisterfahrers ist grundsätzlich vergleichbar niedrig wie auf der freien Strecke. Infolge eines Unfalls mit dem entgegenkommenden Verkehr ist das Schadenausmaß meist höher als bei Kollisionen mit Fahrzeugen gleicher Fahrtrichtung. Geisterfahrer werden im Szenario Kollision (PG\_Kollision) und demzufolge auch im Szenario Brand (PG\_Brand) als Ursache in diesen Szenarien weiter betrachtet. Eine gesonderte Untersuchung des Szenarios Geisterfahrer ist nicht erforderlich.

b) Ausfall Betriebstechnik

Die Auslegung der betriebstechnischen Einrichtungen (Beleuchtung, Sicherheitsausstattung, Hauptenergieversorgung etc.) erfolgt i. d. R. so, dass ein hohes Maß an Redundanz und automatischer Überwachung gewährleistet ist. Darüber hinaus wird gemäß den RABT die Funktion der sicherheitsrelevanten Ausstattungen (Fluchtwegkennzeichnung, Notbeleuchtung, Beleuchtung der Betriebsräume, verkehrstechnische Einrichtungen, Kommunikationseinrichtungen, Messen/ Steuern/Regeln) über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV-Anlage) sichergestellt. Der gleichzeitige Ausfall der Hauptstromversorgung und der USV-Anlage ist äußerst unwahrscheinlich. Die Funktionsfähigkeit der gesamten Betriebstechnik ist durch regelmäßige Wartungen zu erhalten.

Ein Ausfall der Tunnelbeleuchtung behindert den Verkehr, jedoch resultiert daraus nicht unmittelbar ein Schaden. Ein Ausfall kann jedoch Ursache für die Szenarien Kollision oder Stau sein.

Ausfälle der Notrufsprechstellen, des Tunnelfunks, der Fluchtwegkennzeichen oder der Wechsellichtzeichen zur Tunnelsperrung führen zu keiner direkten Gefährdung. Ausfälle führen nur in speziellen Szenarien zu einem erhöhten Ausmaß und sind in den jeweiligen Szenarien zu berücksichtigen. Für die Tunnel ist eine natürliche Längslüftung vorgesehen. Somit ist eine gezielte Steuerung der Zu- und Abluft des Tunnels nicht möglich.

c) Vorfall im vorgelagerten Tunnel

Ereignisse im vorgelagerten Tunnel, wie beispielsweise Pannen, Kollisionen etc. können aufgrund der kurzen Entfernung zwischen den Tunnelbauwerken Nord und Süd Einfluss auf den nachgelagerten Tunnel nehmen. Es kann zu einem Rückstau bis in den nachgelagerten Tunnel kommen, der dort zu Unfällen führen kann. Diese Folgen werden über die Betrachtung des Szenarios Stau (PG\_Stau) erfasst.

d) Starkniederschlag (Regen, Schnee, Hagel)

Auftretendes Niederschlagswasser an den Ein- und Ausfahrbereichen sollte möglichst an den Portalen aufgefangen bzw. abgeleitet werden, sodass das Auffangbecken des nicht durch Niederschlagswasser aus den Außenbereichen belastet wird. Eine Überflutung der Tunnelfahrbahn ist daher sehr selten. Aufgrund des Querneigungswechsels im Bereich des Südportals (Tunnel Nord) in Verbindung mit der hohen Längsneigung kann jedoch ein Eindringen von Niederschlagswasser aus den Vorportalbereichen in den Tunnel nicht gänzlich verhindert werden.

Verschlepptes Regenwasser im Bereich der Portale wird über die Schlitzrinne am tieferliegenden Fahrbahnrand gefasst. Infolge starker Niederschläge und Hagel kann der aus dem Tunnel fahrende Verkehr behindert werden. Dies

führt zu einem Risikopotenzial im Tunnel durch Stau, der zu Unfällen führen kann. Die Risiken von Unfällen infolge von Witterungseinflüssen außerhalb des Tunnels werden im Szenario Kollision (PG\_Kollision) berücksichtigt.

e) Luftfeuchtigkeit im Tunnel

Unter besonderen Witterungsbedingungen kann es beim Einfahren in die Tunnel zu einem Beschlagen von Windschutzscheiben oder Visieren von Motorradhelmen kommen. Darüber hinaus sind grundsätzlich ungünstige Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen möglich, die zu einer Nebelbildung innerhalb der Tunnel führen können.

Den beschriebenen seltenen Witterungsbedingungen kann ohne mechanische Lüftungseinrichtungen nicht gezielt entgegengewirkt werden. Es ist keine automatische Detektion einer Sichttrübung mit der geplanten Ausstattung möglich. Grundsätzlich können Sichtbehinderungen zu Kollisionen führen. Diese werden im entsprechenden Szenario (PG\_Kollision) berücksichtigt.

f) Sturm

Eine Gefährdung infolge Wind und Sturm ist auf den Bereich der freien Strecke und die Portalbereiche beschränkt, in denen Hindernisse zum Liegen kommen können. Diese können zu Stauungen außerhalb der Tunnel und zu einem Rückstau in die Tunnel führen. Diese Folgen werden über die Betrachtung des Szenarios Stau (PG\_Stau) bereits erfasst.

g) Blitzschlag

Durch Blitzschlag kann die technische Ausstattung durch Überspannungen Schaden nehmen. Es wird davon ausgegangen, dass ein gemäß den RABT entsprechender Überspannungsschutz vorgesehen wird. Sollte dennoch ein Teil der betriebstechnischen Tunnelausstattung infolge Blitzschlag ausfallen, so sind die Auswirkungen im Szenario b) Ausfall Betriebstechnik erläutert.

h) Erdbeben

Die Tunnel liegen gem. DIN 4149 und der zugehörigen „Karte der Erdbebenzonen in Deutschland“ in der Erdbebenzone 0. Damit ergibt sich eine äußerst geringe Wahrscheinlichkeit eines relevanten Erdbebens. Eine Berücksichtigung des Szenarios in der nachfolgenden Risikoanalyse ist daher nicht erforderlich.

i) sonstige Naturgefahren

Prinzipiell können aufgrund der vorhandenen Geologie gravitative Naturgefahren wie z. B. Hangrutschungen auftreten. Die Böschungen sind entsprechend ausreichend zu sichern und nach den anerkannten Regeln der Technik auszuführen. Eine gesonderte Betrachtung des Szenarios wird unter der Voraussetzung ausreichender Sicherungsmaßnahmen nicht vorgenommen.

j) Arbeitsunfälle

Zur Vermeidung von Arbeitsunfällen sind die Allgemeinen Sicherheitsvorschriften und Unfallverhütungsvorschriften anzuwenden. Aus Arbeitsunfällen können mögliche Folgeereignisse resultieren, die in den Szenarien Kollision (PG\_Kollision) und Brand (PG\_Brand) berücksichtigt werden.

k) Bedien- und Kommunikationsfehler

Ein Bedienfehler kann z. B. ein fehlerhafter manueller Eingriff auf der Handbedienebene der Tunnelsteuerung sein. Kommunikationsfehler können zwischen den Tunnelnutzern und dem Tunnelpersonal oder auch zwischen den verschiedenen Diensten auftreten. Diese Fehler können ebenso zu Bedienfehlern führen.

Die Meldewege und die Bedienung der sicherheitstechnischen Einrichtungen werden in den entsprechenden Dokumenten zum Betrieb der Tunnel dargelegt (z. B. Sicherheitsdokumentation mit Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Handbücher etc.). Die vorgegebenen Handlungsabläufe sind in regelmäßigen Übungen entsprechend zu proben. Eine gesonderte Betrachtung des Szenarios ist nicht erforderlich.

l) Verfügbarkeit der Einsatzdienste

Eine mögliche Einschränkung der Verfügbarkeit kann durch Verkehrsbehinderungen auf den Zufahrtsstraßen oder durch Verhinderung einzelner Mitarbeiter (bei Alarmierung einer freiwilligen Feuerwehr) entstehen. Die Anfahrtswege der Einsatzdienste sind zur Tunnelöffnung detailliert in den Alarm- und Gefahrenabwehrplänen sowie in den Feuerwehrplänen zu beschreiben. Die Gleichzeitigkeit einer eingeschränkten Verfügbarkeit und eines Schadenereignisses ist als selten einzustufen.

m) Mangelhafte Erhaltung und Betrieb

Die Tunnelbauwerke sind in regelmäßigen Abständen auf Schäden zu überprüfen, sodass Sanierungsmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können. Die Betriebstechnik unterliegt zum einen einer automatischen Prüfung aller Objektgruppen durch die zentrale Leittechnik und zum anderen werden die Bauteile regelmäßig durch das Betriebspersonal oder Fachfirmen gewartet.

n) Sachbeschädigung

Unter Sachbeschädigungen fallen Brandstiftung, Sabotage, Vandalismus, und Diebstahl. Durch das erwartete Verkehrsaufkommen ist stets mit Fahrzeugen im Tunnel zu rechnen, sodass verdächtige Personen oder auffällige Fahrzeuge von anderen Verkehrsteilnehmern gemeldet werden können. Die Personengefährdung infolge Sachbeschädigung oder Diebstahl von Einrich-

tungen wird als gering beurteilt. Eine Brandstiftung wird im Szenario Brand (PG\_Brand) erfasst.

o) Selbstschädigung/Suizid

Ereignisse in Tunneln, die in suizidaler Absicht herbeigeführt werden, ereignen sich relativ selten. Dabei handelt es sich im Regelfall um Unfälle, bei denen der Fahrer sein Fahrzeug bewusst gegen einen festen Einbau des Tunnels lenkt. Dies führt folglich zu den Szenarien Kollision (PG\_Kollision) bzw. Brand (PG\_Brand) und wird als Ursache in diesen Szenarien weiter betrachtet.

## 4.9 Gefahrenanalyse relevanter Szenarien

Die als relevant erachteten Gefährdungen werden im folgenden Schritt der Gefahrenanalyse dahingehend untersucht, inwiefern eine Relevanz vorliegt, die eine weitergehende Untersuchung erforderlich macht.

Die detaillierte Gefahrenanalyse der relevanten Szenarien ist dem Anhang 1 zu entnehmen. Im Folgenden werden die betrachteten Hauptszenarien kurz erläutert und die Ergebnisse zusammengefasst.

### **Szenario Panne**

Ein Pannenszenario ist eine der häufigsten verkehrlichen Störungen. Im Tunnel Nord und Süd bei Eisgrub kann ein Fahrzeug bei einer Panne im Tunnel lediglich auf einem der beiden Fahrstreifen abgestellt werden. Seitenstreifen oder Nothalte-/Pannenbuchten sind in den Tunneln nicht vorgesehen. Verkehrliche Beeinträchtigungen sowie Ausweichmanöver sind demnach im Falle einer Panne zu erwarten.

Eine Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Pannenfahrzeugen kann nur mittels der Wechsellichtzeichen nach Meldung der Panne über die Notrufsprechstellen oder über Mobiltelefon nach manueller Schaltung der überwachenden Stelle erfolgen. Es besteht ein hohes Eskalationspotential für Kollisionen, da frühzeitige Warnhinweise nicht möglich sind.

Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Panne ist jedoch nicht notwendig, da infolge einer Panne keine Schäden zu erwarten sind. Pannen als Ursachen für Unfälle und Brände werden in den Szenarien Kollision und Brand berücksichtigt.

### **Szenario Kollision ohne Brand**

Kollisionen ohne Personenschäden sind im Tunnel im Vergleich zu anderen Schadensereignissen relativ häufig. Die Beteiligung eines Lkw oder eines Busses führt zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes. Schäden an der Infrastruktur

eines Tunnels führen außerdem zu Sperrzeiten bzw. Folgekosten und ggf. zu einer Erhöhung des Gefährdungspotenzials durch eine bauzeitliche Verkehrsführung.

Für die betrachteten Tunnel bei Eisgrub ist infolge der erhöhten Längsneigung von 5 % eine im Vergleich zu anderen Tunneln erhöhte Unfallrate zu erwarten. Mit der verkehrstechnischen Mindestausstattung gemäß den RABT (z. B. WLZ an den Portalen, WVZ zur Verdeutlichung der Tunnelsperrung) ist keine wirksame Sicherheitsausstattung zur frühen Warnung von nachfolgenden Verkehrsteilnehmern bei Kollisionen gegeben. Hierzu sind z. B. automatische Überwachungseinrichtungen zur Erkennung von Störfällen wie z. B. Induktionsschleifen erforderlich.

Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Kollision sollte demnach durchgeführt werden. Dabei sollten zusätzliche Maßnahmen, welche die Unfallschwere als auch die Häufigkeit beeinflussen, in Betracht gezogen werden.

#### **Szenario Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)**

Brände sind in Tunneln relativ seltene Ereignisse, meist handelt es sich hierbei um Kleinstbrände ohne Personenschäden. Durch die Längsneigung von 5 % über einen längeren Streckenabschnitt kann es zu einer Zunahme von Bränden infolge technischer Defekte kommen. Zusätzlich steigt bei einer Längsneigung von 5 % die Brandgefahr infolge erhöhter Kollisionsraten sowohl für die Steigungs-, als auch für die Gefällestrecke.

Aufgrund der erhöhten Längsneigung wird sich im Brandfall eine rasche Rauchausbreitung in den Tunneln einstellen. Diese kann insbesondere bei Brand auf der Gefällestrecke ein erhöhtes Schadensmaß herbeiführen.

Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Brand sollte durchgeführt werden. Dabei sollten zusätzliche Maßnahmen, welche die Schwere des Brandes und die Eintrittshäufigkeit beeinflussen, wie beispielsweise die Anordnung von Notausgängen oder eine automatische Brandmeldeanlage in Betracht gezogen werden.

#### **Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Explosion, Brand, Toxizität**

Die Szenarien „Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR“ sind nicht Bestandteil dieser Gefahrenanalyse und werden im Rahmen einer gesonderten Gefahrgutrisikoanalyse für die Tunnel Eisgrub unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung untersucht (siehe Abschnitt 7).

### **Szenario Hindernis**

Hindernisse wie z. B. verlorene Ladung oder Personen auf der Fahrbahn (z. B. nach Kollisionen oder Pannen) führen häufig zu verkehrlichen Störungen. Eine Nutzung des Tunnels durch Unbefugte wird als selten eingeschätzt.

Hindernisse führen im Regelfall zu Ausweichmanövern und Verzögerungen des Folgeverkehrs. In den Tunneln bei Eisgrub können Hindernisse oder Stau infolge von Hindernissen mittels der geplanten Sicherheitseinrichtungen nicht erkannt werden und die Verkehrsteilnehmer erst nach einer Meldung an die zuständige Stelle über die WLZ an den Portalen gewarnt werden. Es liegt ein hohes Eskalationspotenzial vor.

Eine Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Hindernis wird nicht geführt, da infolge eines Hindernisses kein Risiko bezüglich der Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden zu erwarten ist. Hindernisse als Ursachen für Unfälle und Brände werden in den Szenarien Kollision und Brand berücksichtigt.

### **Szenario Stau auf freier Strecke, Rückstau in den Tunnel**

Ein Stau/stockender Verkehr bzw. Rückstau in die Tunnel besitzen ein hohes Eskalationspotenzial für Auffahrunfälle und daraus resultierende Brandereignisse. Durch die erhöhte Längsneigung der Tunnel wird das Gefährdungspotential von Kollisionen noch verstärkt.

Stau/stockender Verkehr infolge von Überlastung der Strecke wird aufgrund der prognostizierten Verkehrsstärke von ca. 19.300 Kfz/d und einem SV-Anteil von 20 % als selten eingestuft.

Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Stau wird nicht geführt, da Rückstau in die Tunnel als Ursache für Unfälle und einen daraus ggf. resultierenden Brand im Szenario Kollision und Brand berücksichtigt wird.

### **Szenario Betriebsart abweichend von Regelbetrieb**

Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sind in einem Tunnel in regelmäßigen Abständen notwendig. Sie führen jedoch zu einer vom Regelbetrieb abweichenden Verkehrsführung. Arbeitsstellen und daraus resultierende Behinderungen im Tunnel haben ein hohes Eskalationspotenzial (Unfall, Brand), was durch die erhöhte Längsneigung der Tunnels von 5 % noch verstärkt wird.

Unfälle und Brände infolge von Arbeitsstellen und besonderer Verkehrsführung werden in den entsprechenden Szenarien durch die statistischen Eingangsdaten berücksichtigt.

#### **4.10 Ergebnisse der Analyse von Gefährdungsszenarien**

Im Rahmen der Analyse von Gefährdungsszenarien wurden alle relevanten Hauptszenarien untersucht. Dabei wurden Möglichkeiten zur Beschränkung der Häufigkeit und des Schadensausmaßes im Ereignisfall beurteilt.

Der Großteil der betrachteten Szenarien birgt selbst ein eher kleines Risiko. In Bezug auf die Hauptszenarien „Kollision“ und „Brand“ weisen Sie jedoch ein großes Eskalationspotenzial auf.

Hauptaugenmerk der folgenden Sicherheitsbetrachtung liegt daher auf den Auswirkungen der Längsneigung auf die Szenarien „Kollision“ und „Brand“.

Dabei sind zusätzliche Maßnahmen hinsichtlich ihres Risikominderungspotentials unter Berücksichtigung der Kostenwirksamkeit zu bewerten.

Die nicht weiter zu betrachtenden Hauptszenarien sind die Szenarien Panne, Hindernis, Stau und Abweichung vom Regelbetrieb der Tunnel. Diese Szenarien führen primär nicht zu Schäden, so dass eine Risikobetrachtung entfällt. Jedoch können diese Szenarien Ursache für die zu untersuchenden Szenarien Kollision und Brand sein. Mögliche Maßnahmen zur Beschränkung der Häufigkeit werden daher im Rahmen dieser Risikoanalyse betrachtet.

Weiterhin sind die Hauptszenarien, die eine Freisetzung von Gefahrgütern beinhalten, gesondert zu untersuchen. Hierzu wird auf die Gefahrgutrisikoanalyse für eine Entscheidung über eine mögliche Beschränkung von Gefahrguttransporten verwiesen.

#### **4.11 Wirkung der Einflussfaktoren**

Aus den Ergebnissen der Gefahrenanalyse werden für die Einflussfaktoren die Wirkungen auf das Schadensausmaß und die Schadenshäufigkeit von Kollisionen und Bränden abgeleitet.

In der anschließenden Stufe 2 der qualitativen Sicherheitsbetrachtung können so gezielt Maßnahmen konzipiert werden, durch die mögliche Risiken der beiden Tunnel kompensiert werden können.

##### **4.11.1 Längsneigung 5 %**

###### Einfluss der Längsneigung auf die Ereignishäufigkeit

- Szenario: Kollision

Die Gefahr von Unfällen wird durch die Längsneigung von 5 % im Bereich der Steigungsstrecke von Norden nach Süden für die Tunnel Eisgrub erhöht. Dies betrifft insbesondere Auffahrunfälle auf langsam fahrende Fahrzeuge bzw. Unfäl-

le durch ausscherende Fahrzeuge (Unfalltyp 6). Zurückzuführen ist die Erhöhung auf die große Länge der Steigungsstrecke und der daraus resultierenden Geschwindigkeitsabnahme, speziell der des Schwerverkehrs, die zu hohen Differenzgeschwindigkeiten zwischen dem Pkw- und dem Schwerverkehr führt (siehe auch Abschnitt 4.7).

Für die Gefällestrecke der Tunnel Eisgrub von Süden nach Norden ist aufgrund der erhöhten Längsneigung von 5 % eine Geschwindigkeitszunahme aller Fahrzeuge zu erwarten. Diese führt insbesondere für den Schwerverkehr zu längeren Bremswegen und kann eine erhöhte Kollisionshäufigkeit für Fahrurfälle (Unfalltyp 1) durch Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug sowie für einen Aufprall auf Hindernisse (Unfalltyp 7) durch den verlängerten Bremsweg zur Folge haben (siehe auch Abschnitt 4.7).

Dem Einfluss der Gefälle- bzw. Steigungsstrecke auf die Kollisionshäufigkeit kann durch die Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit unter Voraussetzung, dass diese eingehalten wird, bedingt entgegengewirkt werden.

- Szenario: Brand

Die Häufigkeit eines Brandereignisses ist zum einen von der Häufigkeit schwerer Kollisionen mit Brandfolge und zum anderen von der Anzahl technischer Defekte mit Brandfolge, welche in ihrem Auftreten nur schwer zu beeinflussen sind, abhängig.

Die Unfallschwere ist aufgrund der erhöhten Längsneigung als leicht erhöht abzuschätzen. Insbesondere auf der Gefällestrecke führen die erhöhten Geschwindigkeiten im Falle einer Kollision bzw. bei einem Anprall auf ein Hindernis zu größeren Aufprallenergien. Eine maßgebende Erhöhung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Brandes infolge einer Kollision wird nicht erwartet.

Durch die Beanspruchung der Fahrzeuge ist eine leicht erhöhte Ereignishäufigkeit für Brände infolge technischer Defekte in der Steigungsstrecke als auch der Gefällestrecke, z. B. durch Überhitzung der Bremsen, zu erwarten.

#### Einfluss der Längsneigung auf das Schadensausmaß

- Szenario: Kollision

Neben der Häufigkeit von Kollisionen kann auch das Schadensausmaß von Unfällen von der vorliegenden Längsneigung beeinflusst werden. Bei einer Kollision wird das Schadensausmaß durch die infolge des Unfalls getöteten bzw. verletzten Personen bzw. durch den Sachschaden an den Unfallfahrzeugen bzw. der beschädigten Tunnelinfrastruktur bestimmt. Nach [SB FE 2009] sind die größten Schadensausmaße in Richtungsverkehrstunneln bei Fahrurfällen (Unfalltyp 1), gefolgt von Unfällen im Längsverkehr (Unfalltyp 6) zu erwarten. Deutlich geringere Schadensausmaße folgen aus den sonstigen Unfällen (Unfalltyp 7).

Infolge der hohen Längsneigung können sich Verschiebungen innerhalb der Kollisionsverteilung im Vergleich zur Standardverteilung gemäß [SB FE 2009] ergeben. Es ist mit einer Zunahme von Fahrurfällen (Unfalltyp 1), insbesondere auf der Gefällestrecke sowie einer Zunahme von Unfällen im Längsverkehr (Unfalltyp 6), insbesondere auf der Steigungsstrecke, zu rechnen.

- Szenario: Brand

Bei einem Brandereignis wird das Schadensausmaß neben den direkten Unfallbeteiligten durch unbeteiligte Tunnelnutzer bestimmt. Dabei werden flüchtende Personen im Wesentlichen durch den Einfluss von Rauch, bestehend aus 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.

Das Schadensausmaß für den Schadensindikator Todesopfer ist dabei im Wesentlichen von der Interaktion zwischen der Brandgröße, der Personenanzahl im gefährdeten Bereich, der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rauchgasfront, dem Fluchtbeginn der Tunnelnutzer, der Fluchtgeschwindigkeit und der zurückzulegenden Wegstrecke bis zum sicheren Bereich (Portale) abhängig.

Für die Tunnel Eisgrub ist infolge der erhöhten Längsneigung von 5 % von einer raschen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rauchgasfront durch den Kamineffekt auszugehen. Dies hat zu Folge, dass die Sichtweite und damit auch die Orientierungsmöglichkeiten auf der Abluftseite des Tunnels schneller abnehmen. Bei einem Brand in den in Fahrtrichtung fallenden Tunnelröhren (Oströhren) ist daher mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. In Steigungsrichtung (Weströhren) ist bei Stau/stockendem Verkehr, der das Abfließen des Verkehrs hinter dem Brandort verhindert, ebenfalls mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen.

#### 4.11.2 Folge zweier Tunnel

##### Einfluss der Folge zweier Tunnel auf die Ereignishäufigkeit

- Szenario: Kollision

Kommt es im vorgelagerten Tunnel zu einem Ereignis, kann dies zu einer Rückstaubildung bis in den nachgelagerten Tunnel führen. Bei Stau besteht grundsätzlich eine erhöhte Gefahr für Auffahrurfälle auf stehende bzw. abbremsende Fahrzeuge (Unfalltyp 6).

Für die Tunnel wird jedoch keine Erhöhung der Unfallrate infolge der aufeinanderfolgenden Tunnel erwartet.

- Szenario: Brand

Die vorliegende Tunnelkette besitzt keinen Einfluss auf die Ereignishäufigkeit für einen Brand.

#### Einfluss der Folge zweier Tunnel auf das Schadensausmaß

- Szenario: Kollision

Geht man davon aus, dass keine Zufahrtsmöglichkeit auf die B 15n für Ereignisdienste zwischen den Tunneln realisiert wird, so fahren bei einer Kollision im in Fahrtrichtung vorgelagerten Tunnel die Einsatzdienste über den nachgelagerten Tunnel den Einsatzort an. Da die Bildung einer Rettungsgasse bei den Tunneln Eisgrub jedoch insbesondere bei Stau durch die geplanten Tunnelquerschnitte ohne Seitenstreifen erschwert ist, kann es zu Verlängerungen der Anfahrtszeiten kommen. Dies hat zur Folge, dass die Rettungsdienste mit der Rettung/Versorgung der Unfallopfer erst später beginnen können. Daraus folgend wird eine geringe Erhöhung des Schadensausmaßes im Falle einer Kollision erwartet.

- Szenario: Brand

Die Zugriffszeiten der Einsatzdienste zur Fremdrettung und Brandbekämpfung sind erhöht, da bei einer Kollision im in Fahrtrichtung vorgelagerten Tunnel dieser über den nachgelagerten Tunnel angefahren werden muss. Die Bildung einer Rettungsgasse ist insbesondere bei Stau durch die geplanten Tunnelquerschnitte ohne Seitenstreifen erschwert. Dies hat zur Folge, dass die Rettungsdienste erst später am Brandort eintreffen und mit der Brandbekämpfung und Fremdrettung im Gefahrenbereich befindlicher Personen, denen eine Selbstrettung nicht möglich ist, beginnen können.

Die verkehrstechnische Ausstattung der beiden Tunnel ist aufeinander abzustimmen und zu verknüpfen. Bei notwendiger Sperrung des vorgelagerten Tunnels sollte bereits der Verkehr am Einfahren in den nachgelagerten Tunnel gehindert werden. Umgekehrt ist bei Sperrung des nachgelagerten Tunnels ein Abfließen des Verkehrs über den vorgelagerten Tunnel zu gewährleisten, d. h. in diesem Fall ist dieser nicht zu sperren.

## **5 Qualitative Risikoanalyse**

### **5.1 Konzeption und Beurteilung der Wirkung von Maßnahmen**

Es werden nachfolgend Maßnahmen konzipiert, mit denen Sicherheitsdefizite der beiden Tunnel kompensiert werden können. Die Wirkungen der Maßnahmen hin-

sichtlich ihrer Beeinflussung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schäden als auch hinsichtlich des Ausmaßes von Schäden werden beschrieben.

Als risikomindernde Maßnahmen können in Betracht gezogen werden:

1. Herabsetzen der Geschwindigkeitsbeschränkung und Geschwindigkeitsüberwachung
2. Automatische Branddedektion in Kombination mit Kommunikations- und Sperreinrichtungen
3. Orientierungsbeleuchtung
4. Lüftungssteuerung mit Strahlventilatoren im Regelbetrieb
5. Verkehrstechnische Erfassungs- und Anzeigesysteme
6. Selbstleuchtende Markierungselemente auf den Notgehwegen
7. Verkürzung der Fluchtwege durch Querverbindungen zwischen den Röhren
8. Notrufstationen im Tunnel
9. Anordnung eines Seitenstreifens

#### **5.1.1 Herabsetzen der Geschwindigkeitsbeschränkung und Geschwindigkeitsüberwachung**

Als sicherheitserhöhende Maßnahme kann eine Geschwindigkeitsbeschränkung von 60 km/h vorgesehen werden. Die geplante zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt derzeit 80 km/h. Zur Minimierung von Geschwindigkeitsüberschreitungen kann eine stationäre Geschwindigkeitsüberwachung installiert werden. Die Verkehrsteilnehmer sind auf die Überwachung deutlich hinzuweisen.

##### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Das Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wirkt sich positiv auf den Bremsweg bzw. Anhalteweg von Fahrzeugen aus, die aufgrund eines Hindernisses oder vorausfahrenden Fahrzeugs plötzlich abbremsen müssen. Das Risiko von Kollisionen durch Auffahren eines Fahrzeugs auf ein langsameres Vorderfahrzeug sowie durch Spurwechsel verursachte Kollisionen können reduziert und zusätzlich kann der Verkehrsfluss harmonisiert werden.

Mit einer Geschwindigkeitsüberwachung kann die Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gefördert werden. Mit einem sinkenden Anteil von Geschwindigkeitsüberschreitungen kann der Anteil von Fahrurfällen bzw. Unfällen im Längsverkehr durch nicht angepasste Geschwindigkeiten und große Differenzgeschwindigkeiten, die infolge der erhöhten Längsneigung von 5,0 % zu erwarten sind, gesenkt werden.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Das Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit führt zu einer Verringerung der Ausmaße von Personen- und Sachschäden aufgrund geringerer Aufprallenergien.

Eine Geschwindigkeitsüberwachung führt zu einer Verminderung von Geschwindigkeitsüberschreitungen. Dadurch können Unfallfolgen infolge hoher Aufprallenergien und damit das Ausmaß von Personen- und Sachschäden reduziert werden.

### **5.1.2 Automatische Branddetektion in Kombination mit Kommunikations- und Sperreinrichtungen**

Zur schnellen Brandmeldung und Maßnahmenergreifung kann eine automatische Branddetektion vorgesehen werden. Diese kann mittels linienhaften Wärmemeldesystemen (Linienmeldern), die oberhalb des lichten Raums an der Tunneldecke angebracht werden, oder über eine automatische Videobildauswertung (Videodetektion) realisiert werden.

Zur Warnung und Informationen der Tunnelnutzer im Brandfall sind in Kombination mit der automatischen Brandmeldeanlage Lautsprecher im Tunnel vorzusehen. Zur Lagebeurteilung und gezielten Einsprache in den Tunneln durch die überwachende Stelle sind zudem Videokameras erforderlich.

Nach den Vorgaben der RABT sind derzeit nur zweifeldrige Wechsellichtzeichen zur Tunnelsperrung an den Portalen vorgesehen. Daher werden in der Maßnahmenbetrachtung zudem in Kombination mit der automatischen Brandmeldeanlage und den Lautsprechern Sperrschranken vorgesehen.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Die Ereignishäufigkeit eines Brandes wird nicht beeinflusst. Durch eine frühzeitige Branddetektion kann jedoch bei schnellerem Eintreffen der Feuerwehr die Eintrittswahrscheinlichkeit von großen Brandleistungen reduziert werden.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Das Schadensausmaß im Fall eines Brandes ist im Wesentlichen abhängig von der Anzahl an Personen im Tunnel. Diese wird vom Zufluss des Verkehrs bis zur Tunnelsperrung beeinflusst.

Durch eine automatische Branddetektion kann ein Brandereignis frühzeitig erkannt und gleichzeitig automatische Maßnahmen eingeleitet werden. Bei automatischer Branddetektion ist eine automatische Sperrung des Tunnels vorzunehmen. Mit Hilfe der Sperrschranken kann dabei die weitere Einfahrt von Fahrzeugen in den Gefahrenbereich des Tunnels verhindert werden.

Über eine automatische Videobildauswertung (Videodetektion) können insbesondere kleinere und langsamer ablaufende Brände frühzeitiger als über Linienbrandmelder detektiert werden. Bei den hier vorliegenden kurzen Tunnellängen führen insbesondere eine sehr schnelle Branddetektion und entsprechend schnell eingeleitete Maßnahmen zu einer Erhöhung der Sicherheit in der Selbstrettungsphase.

Mit Hilfe der Lautsprecher können im Tunnel befindliche Personen frühzeitig gewarnt und informiert werden, so dass sich Verbesserungen bei dem Fluchtverhalten von Personen ergeben. Dadurch kann das Schadensausmaß weiter gesenkt werden.

### **5.1.3 Orientierungsbeleuchtung**

Im Brandfall wird die Tunnelbeleuchtung durch Rauch in ihrer Lichtverteilung so eingeschränkt, dass die Sichtweite der Tunnelnutzer stark reduziert wird und so ein Erkennen der Fluchtwege und Notausgänge nicht immer möglich ist.

Um die Sichtverhältnisse im Brandfall zu verbessern kann eine Orientierungsbeleuchtung gemäß den RABT in Abständen von  $\leq 25$  m angeordnet werden.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Es liegt kein Einfluss auf die Ereignishäufigkeit vor.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Die Fluchtgeschwindigkeit und der daraus resultierende Erfolg einer Selbstrettung sind abhängig von der vorhandenen Sichtweite. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen.

Mit Hilfe der Orientierungsbeleuchtung können die Sichtverhältnisse im Brandfall verbessert bzw. die Selbstrettung unterstützt werden, so dass eine Reduzierung des Schadensausmaßes zu erwarten ist.

Eine Orientierungsbeleuchtung ist insbesondere in Kombination mit einer automatischen Brandmeldeanlage empfehlenswert.

### **5.1.4 Lüftungssteuerung mit Strahlventilatoren im Regelbetrieb**

Zur Strömungskontrolle können Strahlventilatoren im Tunnelraum installiert werden, die bereits im Regelbetrieb eine für den Brandfall günstige Strömung gewährleisten. Durch die Strömungskontrolle kann der schnellen Rauchausbreitung infolge der erhöhten Längsneigung entgegengewirkt werden.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Es liegt kein Einfluss auf die Ereignishäufigkeit vor.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Die hohe Längsneigung führt zu einer starken Kaminwirkung und damit schnellen Rauchausbreitung im Brandfall. Dies hat in der Steigungsstrecke (Weströhren) im Fall von Stau in der gesamten Tunnelröhre und in der Gefällstrecke (Oströhren) negative Auswirkungen auf die Sicherheit im Brandfall.

Für die Tunnel Eisgrub ist keine Strömungskontrolle der Tunnelluftgeschwindigkeit vorgesehen, so dass hohe Längsströmungen erreicht werden können. Bei einem Brand führt dies zu einem schnellen Verrauchen des Tunnelraums innerhalb weniger Minuten in einem großen Bereich.

Die ersten Sekunden eines Brands laufen in einem Tunnel mit und ohne Strahlventilatoren gleich ab. Wird die Ventilation bereits 15 s nach Brandbeginn aktiviert, so steht die volle Ventilationsleistung erst nach ca. weiteren 60 s zur Verfügung. Selbst bei schneller Detektion im Tunnel hat sich der Rauch bereits stark im Tunnel ausgebreitet, bevor die Wirkung der Brandventilation einsetzt. Eine Längsgeschwindigkeit von z. B. 5 m/s führt nach 60 s und schnellem Brandverlauf zu einem Verrauchen des Tunnelraums in einem Bereich von ca. 300 m und damit zu einer Gefährdung der sich im Tunnel aufhaltenden Personen. Eine positive Wirkung auf die Selbstrettungsmöglichkeiten eines erst bei Branddetektion einsetzenden Brandlüftungsprogramms ist aufgrund der kurzen Tunnellängen nicht gegeben.

Eine schnelle Rauchausbreitung kann daher nur durch eine Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit bereits im Normalbetrieb vermieden werden. Dadurch kann die Rauchausbreitung verlangsamt werden, so dass Teile des Tunnels für eine ungehinderte Flucht länger rauchfrei bleiben. Das Ausmaß für den Schadenindikator Todesopfer im Brandfall kann hierdurch gesenkt werden.

### **5.1.5 Verkehrstechnische Erfassungs- und Anzeigesysteme**

Durch eine Verkehrsüberwachung (z. B. durch Induktionsschleifen) zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten, wie zähfließendem Verkehr oder erheblichem Stau kann in Verbindung mit einer darauffolgenden automatischen Schaltung von Warnhinweisen z. B. Gelbblinken der Wechsellichtzeichen (WLZ) oder ggf. Sperrung des Tunnels die Ereignishäufigkeit von Kollisionen als auch das Schadensausmaß bei Bränden gesenkt werden.

Zudem kann bei Erfassung der Verkehrsqualität in Kombination mit einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) mit Wechselverkehrszeichen eine verkehrabhängige Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit über Wechselver-

kehrszeichen und eine Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Verkehrsstörungen erfolgen, so dass Folgeunfälle vermieden werden können.

Mit Hilfe einer Videodetektion können zudem bereits stehende Fahrzeuge (Pannenfahrzeuge oder Kollisionsfahrzeuge), die ein Hindernis für den nachfolgenden Verkehr darstellen, detektiert werden.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Die Ereignishäufigkeit von Kollisionen infolge von Hindernissen, wie z. B. Pannenfahrzeugen, die zunächst zu einer Beeinträchtigung des fließenden Verkehrs führen, kann durch Warnung von Verkehrsteilnehmer über die WLZ an den Portalen und die Verkehrsbeeinflussungsanlage mit Wechselverkehrszeichen (WVZ) reduziert werden.

Mit Hilfe der WVZ kann die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Bedarfsfall reduziert werden. Zudem können Verkehrsteilnehmer mittels der WVZ vor Störungen gewarnt werden und ihr Fahrverhalten frühzeitig an die jeweilige Situation anpassen.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Folgeereignisse mit evtl. größeren Schadensausmaßen können durch die Detektion einer Störungen bzw. eines Staus und der damit einhergehenden Warnung der nachfolgenden Verkehrsteilnehmer ggf. verhindert werden.

Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer im Brandfall ist vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Mit der Reduzierung des Stauanteils geht demnach auch eine Reduzierung des Schadensausmaßes im Brandfall einher.

### **5.1.6 Selbstleuchtende Markierungselemente auf den Notgehwegen**

Zur Verbesserung der visuellen Führung im Regelbetrieb und der Orientierung im Brandfall können selbstleuchtende Markierungsknöpfe am rechten und linken Fahrbahnrand vorgesehen werden.

Jedes Markierungselement verfügt über zwei unabhängig voneinander schaltbare weiße Lichtquellen, die sowohl in, als auch gegen die Fahrtrichtung strahlen können. Im Regelbetrieb leuchten sie entgegen der Fahrtrichtung. Im Brandfall leuchten sie mit und entgegen der Fahrtrichtung.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Selbstleuchtende Markierungsknöpfe verbessern die Einhaltung der Spurführung im Regelbetrieb und können so Unfälle, welche als Ursache ein Abkommen von der Fahrbahn haben, senken.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Selbstleuchtende Markierungsknöpfe stellen eine zusätzliche Orientierungsquelle zur Erleichterung der Flucht im Brandfall dar.

### **5.1.7 Verkürzung der Fluchtwege durch Querverbindungen zwischen den Röhren**

Um die Fluchtwege im Brandfall zu verkürzen können Notausgänge in Form von Querverbindungen zwischen den Tunnelröhren angelegt werden.

Die Querschläge sind gemäß den RABT mit Türen gegenüber den Tunnelröhren zu verschließen. Bei Öffnen der Türen sind die Verkehrsteilnehmer zu warnen, um eine Gefährdung der flüchtenden Personen durch fließenden Verkehr zu vermeiden.

Die Notausgänge sind entsprechend den Vorgaben der RABT zur besseren Wahrnehmung in Grün auszuführen und mit einem ständig selbstleuchtenden grünen Rahmen aus Leuchtelementen zu versehen. Zudem sind die Notausgänge mittels zweiseitigen Rettungszeichen mit Blitzleuchte zu kennzeichnen.

Mit der Flucht der Tunnelnutzer in die Nachbarröhre sind jedoch auch Gefahren durch den fließenden Verkehr in der nicht betroffenen Röhre verbunden.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Es liegt kein Einfluss auf die Ereignishäufigkeit vor.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Die Errichtung von Querschlägen zwischen den Röhren verkürzt die Fluchtwege der Tunnelnutzer bei einem Brandereignis. Durch die Maßnahme kann das Schadensausmaß im Brandfall gesenkt werden.

Zu beachten ist jedoch, dass der fließende Verkehr der nicht betroffenen Röhre eine zusätzliche Gefahrenquelle für flüchtende Personen darstellen kann. Die benachbarte Röhre sollte demnach nach einem erfassten Brandereignis bzw. dem Öffnen der Fluchttüre gesperrt werden.

### **5.1.8 Notrufstationen im Tunnel**

Um im Ereignisfall eine Meldung an die ständig besetzte Stelle zu erleichtern und das eigenständige Löschen kleinerer Brände in ihrer Entstehungsphase mittels

Handfeuerlöschern zu ermöglichen, können nach den RABT ausgebildete und gekennzeichnete Notrufstationen im Tunnel vorgesehen werden.

Diese sind, sofern sie nicht in Querstollen angeordnet sind, begehbar auszubilden (Notrufkabinen). Neben dem Notruftelefon verfügen die Stationen über zwei Handfeuerlöscher sowie einen vom Notgehweg barrierefrei zu erreichenden Handfeuermelder und Großflächen-Ruftaster.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Durch eine schnelle Ereignismeldung über die Sprechstellen wird eine beschleunigte Maßnahmenergreifung im Ereignisfall (z. B. Tunnelsperrung über WLZ an den Portalen, schnellere Absicherung der Pannen- /Unfallfahrzeuge durch Ereignisdienste) ermöglicht. Die Eintrittshäufigkeit für Folgeereignisse kann so gesenkt werden.

Des Weiteren können durch die vorhandenen Handfeuerlöscher kleine Brände in ihrer Entstehungsphase eigenständig durch die Tunnelnutzer gelöscht bzw. in ihrem Brandverlauf positiv beeinflusst werden.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Manuelle Brandmeldeeinrichtungen in Form von Handfeuermeldern können, wie die automatische Branddetektion, zur schnelleren Branderkennung und Maßnahmenergreifung führen.

Mit dem Auslösen einer manuellen Brandmeldung kann eine automatische Sperrung des Tunnels initiiert werden. So kann auch ohne das Eingreifen einer ständig besetzten Stelle das Einfahren von weiteren Fahrzeugen in den Tunnel verhindert werden.

Notrufstationen führen dazu, dass die ständig besetzte Stelle, unter Vernachlässigung der Meldung des Ereignisses per Mobiltelefon, schneller über ein Brandereignis informiert wird. Folglich können geeignete Maßnahmen, wie beispielsweise die Tunnelsperrung, welche eine Reduzierung der im Gefahrenbereich befindlichen Personen herbeiführt, ergriffen werden. Ebenfalls kann bei schnellerer Alarmierung die Brandbekämpfung und Fremdrettung früher erfolgen.

### **5.1.9 Anordnung eines Seitenstreifens**

Zum Abstellen von Pannen- und gegebenenfalls Kollisionsfahrzeugen kann ein Seitenstreifen angelegt werden.

#### Einfluss auf die Ereignishäufigkeit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken“ (FE 02.0333/2011/EGB) [SB EEA 2014] wurden für insgesamt 41 Richtungsverkehrstunnel die Unfalldaten analysiert und verglei-

chend gegenübergestellt. Ein Ergebnis der Unfallanalyse ist, dass eine Anordnung von Seitenstreifen zur Senkung der Unfallrate und der mittleren Unfallkostenrate bei 2-streifigen Tunnelquerschnitten beitragen kann.

#### Einfluss auf das Schadensausmaß

Durch die Anlage eines Seitenstreifens wird die Bildung einer für die Ereignisdienste ausreichend breiten Rettungsgasse gefördert, so dass die Zugriffszeit reduziert und die Rettung/Brandbekämpfung positiv beeinflusst werden kann.

## 5.2 **Kostenwirksamkeit der Maßnahmen**

### *1. Herabsetzen der Geschwindigkeitsbeschränkung und Geschwindigkeitsüberwachung*

Bei einer dauerhaften Beschränkung auf 60 km/h entstehen zusätzliche Investitions- und Unterhaltungskosten in geringem Maße durch die Ausbildung eines Geschwindigkeitstrichters, um die zulässige Höchstgeschwindigkeit der angrenzenden Streckenabschnitte schrittweise auf den Zielwert herabzusetzen.

Der Nutzen einer ständigen Geschwindigkeitsüberwachung liegt, vorausgesetzt die Verkehrsteilnehmer werden deutlich auf die Überwachung hingewiesen, in der Verhinderung von Initialereignissen mit Eskalationspotential.

Durch die verhältnismäßig niedrigen Kosten der Maßnahmen und die voraussichtlich zu erreichende Begrenzung der Unfallhäufigkeit ist eine Kostenwirksamkeit gegeben.

### *2. Automatische Branddetektion in Kombination mit Kommunikations- und Sperrrichtungen*

Die automatische Branddetektion über ein Brandmeldekabel ist grundsätzlich nicht kostenintensiv und bietet den Rettungskräften die Möglichkeit eines schnellen und gezielten Eingreifens im Brandfall. Um eine Wirksamkeit der Maßnahme für die Selbstrettungsphase zu erzielen, sollte mit Detektion jedoch auch eine Warnung der Tunnelnutzer (Installation einer Lautsprechanlage) einhergehen sowie der Verkehr entsprechend beeinflusst werden (über WLZ an den Portalen und Sperranlage). Grundsätzlich werden Tunnel, die mit einer automatischen Branddetektion ausgestattet sind, zur Analyse des vorliegenden Alarms auch videoüberwacht.

Die automatische Branddetektion per Video ist kostenintensiver und gleichzeitig mit einer frühzeitigeren Detektion eines entstehenden Brandes in seiner Entstehungsphase verbunden.

Die Wirksamkeit der automatischen Branddetektion über ein Brandmeldekabel ist, unter Voraussetzung einer gleichzeitig anlaufenden Alarmierung der Tunnelnutzer und Tunnelsperrung, auf den Fall eines schnell verlaufenden Brandes, der

zu einer schnellen Detektion durch das Brandmeldekabel und damit zu einer schnellen Warnung der Tunnelnutzer führt, begrenzt. Insbesondere da sich Rauchgase aufgrund der kurzen Tunnellängen und vorliegenden Längsneigungen bei entsprechender Längsströmung innerhalb von wenigen Minuten bis zum Portal ausbreiten.

Die Wirksamkeit der Maßnahme ist in der quantitativen Risikoanalyse daher genauer zu verifizieren.

### *3. Orientierungsbeleuchtung*

Für die Orientierungsbeleuchtung fallen hinnehmbare Kosten an. Bei Errichtung einer automatischen Branddetektion ist die Kostenwirksamkeit für die Orientierungsbeleuchtung gewährleistet.

### *4. Lüftungssteuerung mit Strahlventilatoren im Regelbetrieb*

Eine Lüftungssteuerung mit Strahlventilatoren im Regelbetrieb führt zu sehr hohen Betriebskosten. Die positive Wirkung beschränkt sich auf sehr seltene Ereignisse mit ungünstigen Randbedingungen. Eine Kosten-Wirksamkeit ist daher erfahrungsgemäß nicht gegeben.

### *5. Verkehrstechnische Erfassungs- und Anzeigesysteme*

Eine Verkehrsüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten, (zähfließendem Verkehr, erheblichem Stau) kann z. B. mittels Induktionsschleifen erfolgen. Bei Detektion eines stockenden Verkehrsflusses kann dann mit den geplanten Wechsellichtzeichen eine Warnung der Verkehrsteilnehmer erfolgen. Eine größere Kostenwirksamkeit hat die Installation einer Verkehrsüberwachung in Kombination mit der Installation von Wechselverkehrszeichen, mit denen eine Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder auch Warnung der Verkehrsteilnehmer erfolgen können.

Für die Umsetzung einer Videodetektion, einschließlich der Videokameras, fallen deutlich höhere Kosten an als für Induktionsschleifen. Die Videodetektion kann zusätzlich zur Branddetektion eingesetzt werden und weist folglich einen Doppelnutzen auf.

### *6. Selbstleuchtende Markierungselemente auf den Notgehwegen*

Selbstleuchtende Markierungsknöpfe weisen verhältnismäßig geringe Installations- und Betriebskosten auf. Die Kostenwirksamkeit der Maßnahme ist demnach erfahrungsgemäß gegeben.

### *7. Verkürzung der Fluchtwege durch Querverbindungen zwischen den Röhren*

Eine Verkürzung der Fluchtwege mittels Verbindungen zur benachbarten Röhren ist kostenintensiv, führt aber insbesondere beim Tunnel Süd aufgrund seiner

Länge von 395 m zu deutlich besseren Fluchtbedingungen im Brandfall. Die Kostenwirksamkeit ist dort daher gegeben.

Die Wirksamkeit der Maßnahme zur Kompensation einer raschen Rauchausbreitung infolge der Längsneigung im Tunnel Nord und Süd ist jedoch in der quantitativen Risikoanalyse genauer zu verifizieren.

Der Verkehr der Nachbarröhre stellt jedoch eine Gefahrenquelle für die flüchtenden Tunnelnutzer dar, die in Form einer Beeinflussung und Warnung des fließenden Verkehrs zu berücksichtigen ist.

#### *8. Notrufstationen im Tunnel*

Mit der Installation von Handfeuermeldern im Tunnel besteht die Möglichkeit den Tunnel ohne Eingreifen einer überwachenden Stelle mit Abgabe der Brandmeldung automatisch zu Sperren. Die Kostenwirksamkeit ist hierfür gegeben.

Die Investitionskosten für die Anlage von Notrufstationen verringern sich bei der Anordnung in Querschlägen und gleichzeitigem Verzicht der Anlage in den Tunnelröhren. Besonders dann ist eine Kostenwirksamkeit gegeben.

#### *9. Anordnung eines Seitenstreifens*

Bei Anlage eines Seitenstreifens steigen die Investitionskosten infolge der erforderlichen Querschnittsvergrößerung der Tunnelröhre erheblich, so dass die Kostenwirksamkeit nicht gegeben ist.

### **5.3 Empfehlung**

Mit Hilfe der qualitativen Bewertung wird eine Bewertungsmatrix (Tabelle 7) für die zusätzlichen Maßnahmen aufgestellt. In dieser werden das Risikominderungspotenzial sowie die Kosten bzw. Kostenwirksamkeit der Maßnahmen berücksichtigt. Die risikomindernde Wirkung der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Maßnahmen wird durch das Maß der Beeinflussung der Ereignishäufigkeit und des Schadensausmaßes erfasst.

Maßnahmenkonzept		Ereignishäufigkeit		Schadensausmaß		Kosten (Investition + Unterhaltung)	Abschätzung Kostenwirk- samkeit
		Kollision	Brand	Kollision	Brand		
1.	Geschwindigkeitsbeschränkung und -überwachung	■	■	■	■	■	gegeben
2.	BMA, Kommunikations- und Sperreinrichtungen (Linienmelder)	■	■	■	■	■	gegeben
3.	Orientierungsbeleuchtung	■	■	■	■	■	in Kombination mit 2. gegeben
4.	Strömungskontrolle bereits im Regelbetrieb	■	■	■	■	■	nicht gegeben
5.	Verkehrstechnische Erfassungs- und Anzeigesysteme (Induktionsschleifen)	■	■	■	■	■	gegeben
6.	Selbstleuchtende Markierungselemente	■	■	■	■	■	gegeben
7.	Querschläge	■	■	■	■	■	gegeben
8.	Notrufstationen	■	■	■	■	■	gegeben
9.	Seitenstreifen	■	■	■	■	■	nicht gegeben

**Legende**

Eintrittshäufigkeit und Schadensausmaß

■ unbeeinflusst      ■ sinkt      ■ sinkt stark

Kosten

■ gering      ■ mäßig      ■ hoch

Tabelle 7: Bewertungsmatrix der zusätzlichen Maßnahmen

Basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Bewertung der zusätzlichen Maßnahmen werden die folgenden zweckmäßigen Maßnahmen in der anschließenden quantitativen Risikoanalyse näher untersucht:

- Verkürzung des Notausgangsabstands durch Querverbindung zwischen den Tunnelröhren

- Herabsetzen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit (Geschwindigkeitsreduktion) in Verbindung mit einer stationären Geschwindigkeitskontrolle
- Installation zusätzlicher sicherheitstechnischer Ausstattung in Form von einer automatischen Brandmeldeeinrichtung, einer Kommunikationsanlage sowie einer Tunnelsperranlage
- Kombination eines verkürzten Notausgangabstands und Installation zusätzlicher sicherheitstechnischer Ausstattung

Insbesondere, wenn Querverbindungen zwischen den Tunnelröhren auf Basis der Ergebnisse der quantitativen Risikoanalyse oder Gefahrgutrisikoanalyse erforderlich werden, wird die Anordnung von nach den RABT ausgebildeten Notrufstationen in den Tunneln empfohlen.

Zudem wird die Installation von aktiven Leiteinrichtungen auf den Notgehwegen empfohlen.

Die Wirkungen dieser Maßnahmen werden im Rahmen der quantitativen Risikoanalyse nicht weiter untersucht.

## 6 Quantitative Risikoanalyse

### 6.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Beide Tunnelbauwerke weisen eine Längsneigung von 5 % auf und weichen somit von der nach RABT zulässigen Längsneigung von 3% signifikant ab.

Die betriebstechnische Ausstattung der Tunnel Eisgrub entspricht hierbei der Mindestausstattung nach RABT. Das bedeutet, dass die Tunnelröhren aufgrund ihrer Tunnellänge u. a. ohne Ventilation, automatische Brandmeldeanlage, Lautsprecher- oder Videoanlage konzipiert sind.

Ziel der quantitativen Risikoanalyse (QRA) ist es, das Sicherheitsniveau für die Tunnel Eisgrub in Abhängigkeit verschiedener Ausführungsvarianten zu ermitteln, um die notwendigen sicherheitserhöhenden Maßnahmen zu bestimmen. Aufgrund der Abweichung vom Regelwerk bezüglich der Längsneigung sind notwendige Maßnahmen in jedem Fall umzusetzen, um ein ausreichendes Sicherheitsniveau zu erreichen.

Die Berechnungen werden für die kritischste Röhre durchgeführt. Über Analogieschlüsse werden Aussagen über die weiteren Tunnelröhren getroffen.

### 6.2 Untersuchungsgrundlagen

In nachfolgender Tabelle 8 sind die wesentlichen Kenndatendaten der Tunnel Eisgrub, die der QRA zugrunde gelegt werden zusammengefasst.

Tunnelparameter	Bauwerk BW51/1 (Tunnel Nord)	Bauwerk BW51/2 (Tunnel Süd)
Verkehrsart	Richtungsverkehr (RV)	
Anzahl Tunnelröhren	2	
Anzahl Fahrstreifen pro Fahrrichtung je Röhre	2	
Seitenstreifen	-	
Notgehwege	1,00 m beidseits der Fahrbahn	
Tunnellänge	255 m	395 m (ggf. 500 m)
Bauweise	Offene und bergmännische Bauweise	
Regelquerschnitt lichte Bauhöhe: lichte Breite	RQ31t 7,04 m mind. 9,50 m	
Längsneigung	≤ 5 % (FR Süd), ≥ -5 % (FR Nord)	
Lüftungssystem	natürliche Ventilation (RABT-konform, da < 400 m)	
Bemessungsbrandleistung	30 MW (nur zur Auslegung von mechanischen Lüftungsanlagen relevant)	

Tunnelparameter	Bauwerk BW51/1 (Tunnel Nord)	Bauwerk BW51/2 (Tunnel Süd)
Entwässerung	Die Entwässerung der Fahrbahn über Schlitzrinnen am jeweils tieferliegenden Fahrbahnrand.	
Notausgangsabstand	255 m (da kein Notausgang geplant)	395 m (da kein Notausgang geplant)
Kommunikationseinrichtungen	Notrufsprechstellen an den Tunnelportalen	
Überwachungseinrichtungen	keine (RABT-konform, da < 400 m)	
Tunnelsperranlage	WLZ Rot/Gelb am Tunnelportal	
Besonderheiten	Längsneigung >> 3%	

Tabelle 8: Eingangsparameter QRA Tunnel Eisgrub

In Tabelle 9 sind die Eingangsdaten der Risikoanalyse bezüglich des Verkehrs zusammenfassend aufgeführt.

Verkehrsdaten Tunnel Eisgrub	
zul. Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
prognostizierter DTV <sub>w</sub> (Werktags)	Jahr 2030: 19.300 Kfz/24h (bzw. 30.000 Kfz/h)
Verkehrsaufkommen Tag/Nacht	6 - 21 Uhr: 1.045 Kfz/h 21 - 6 Uhr: 402 Kfz/h
Schwerverkehrsanteil am DTV <sub>w</sub>	20 %
Busanteil am SV	5 %
Gefahrgutanteil am SV	6 %

Tabelle 9: Verkehrsdaten Tunnel Eisgrub

Anhand der oben dargestellten Parameter ist abzulesen, dass sich die höheren Risiken für den Tunnel Süd ergeben. Durch die größere Tunnellänge ergeben sich hier größere Fluchtwegdistanzen, die in ungünstigen Fällen zurückzulegen sind. Dies wirkt sich negativ auf die Schadensausmaße aus. Für beide Tunnel gilt die gleiche Verkehrsbelastung, durch die vergleichbare Gradienten ergeben sich hier auch gleiche zu erwartende Unfallraten. Im Tunnel Süd sind damit höher Unfallzahlen und Brände infolge Unfall zu erwarten. Die Erhöhung ist linear aus der Tunnellänge ableitbar und beträgt etwa 55 %. Auch die aus der Fahrleistung ableitbare Brandrate infolge Selbstzündung liegt auf vergleichbarem Niveau. Aufgrund der annähernd gleichen Gradienten gilt für beide Tunnel auch ein vergleichbarer thermischer Auftrieb. Daher werden die nachfolgenden quantitativen Untersuchungen für den Tunnel Süd durchgeführt.

### 6.3 Vorgehensweise

Als Maß für die Bewertung der Sicherheit von Tunnelanlagen dient das auf ein Bezugssystem referenzierte Risiko. Zur Quantifizierung von Risiken sind Kennt-

nisse 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:

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

Der prinzipielle Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse ist in Abbildung 9 dargestellt. Die einzelnen Verfahrensschritte und Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung werden nachfolgend kurz erläutert.

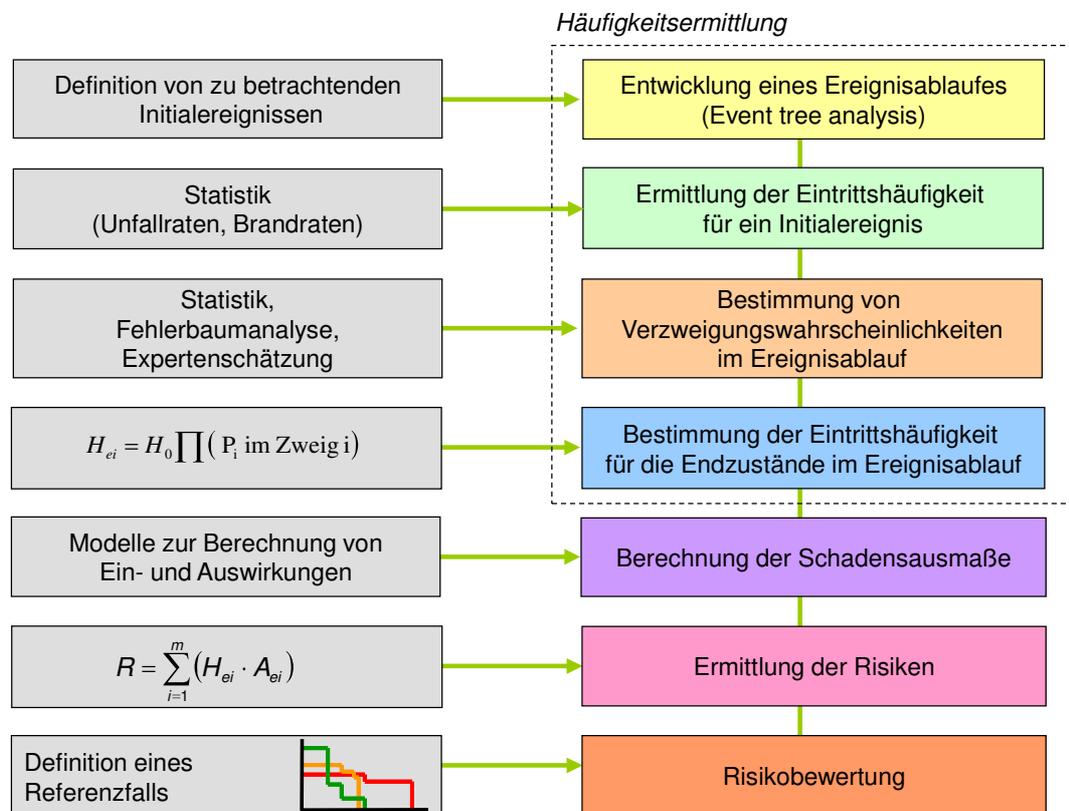


Abbildung 9: Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse und Risikobewertung

### 6.3.1 Häufigkeitsermittlung

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

#### 6.3.1.1 Definition von auslösenden Ereignissen

Entsprechend den im [SB FE 2009] getroffenen Festlegungen zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln mittels quantitativer Risikoanalysen und Risikobe-

wertungen werden der Sicherheitsüberprüfung folgende auslösende Ereignisse (Initialereignisse) zugrunde gelegt:

- Unfall
- Unfall mit Brandwirkung
- Technischer Defekt mit Brandwirkung

### 6.3.1.2 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 10 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

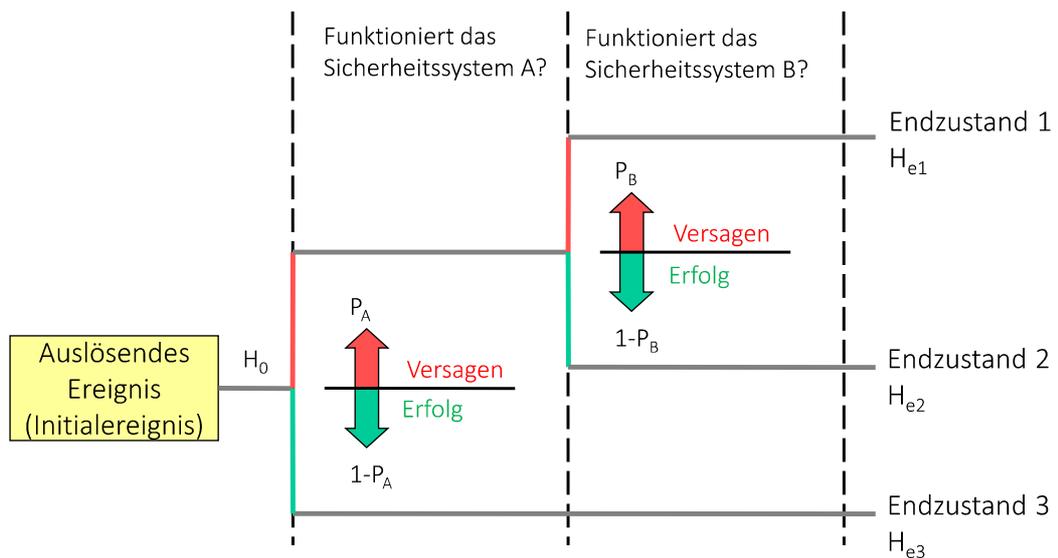


Abbildung 10: Beispiel für einen Ereignisbaum

Wesentliche Verzweigungspunkte im Ereignisablauf bilden hierbei:

- Ereignisort (z. B. Einfahrtsbereich / Tunnelinnenstrecke)
- Verkehrsaufkommen zu bestimmten Zeiträumen (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)
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Beginn der Fremdrettung.

In Abhängigkeit des jeweiligen Untersuchungsfalls ergeben sich somit zwischen 1.440 und 8.640 Endzustände (siehe Tabelle 10). Daraus resultieren insgesamt 20.160 Endzustände.

#### 6.3.1.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten für ein Initialereignis

Für die Ereignisablaufanalyse werden als Eingangswerte die Eintrittshäufigkeiten für die Initialereignisse Unfall, Unfall mit Brandwirkung und Technischer Defekt mit Brandwirkung benötigt. Bei deren Ermittlung sind tunnelspezifische Parameter zu berücksichtigen wie z. B.:

- Verkehrsaufkommen (DTV)
- Schwerverkehrsanteil (SV)
- Tunnellänge
- Tunnelbetriebsart (RV / GV)
- Zu- und Abfahrten im Tunnel.

#### 6.3.1.4 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.

#### 6.3.1.5 Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden über folgende Formel 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  $i$

### 6.3.2 Berechnung der Schadensausmaße

Während Schadensausmaße für die häufigeren Ereignisse mit tendenziell 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.

#### 6.3.2.1 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 Genauigkeit der geometrischen Abbildung und der Rechenergebnisse.

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

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

Basis für die Umsetzung der jeweiligen Steuerungen bilden Gutachten zur Belüftung und dem Verkehrsaufkommen bzw. -ablauf.

Nachfolgende Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt aus dem 395 m langen Tunnel Eisgrub als 3D-Modellierung mittels FDS.

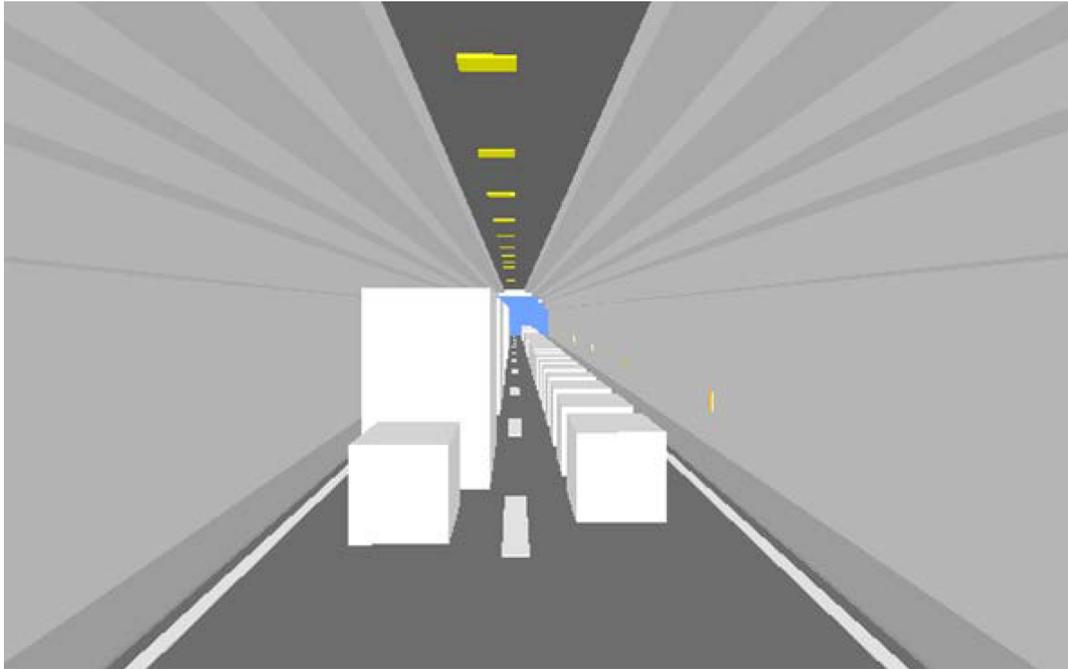


Abbildung 11: 3D-Modellierung mit FDS (Fire Dynamic Simulation) des Tunnel Eisgrub, Bauwerk 51/2

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.

Zur Ermittlung der Einwirkungen wurden je Untersuchungsfall zwischen 18 und 36 CFD-Simulationen erforderlich. Insgesamt resultieren daraus 72 Simulationen (siehe Tabelle 11).

#### 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 Notaus-

gängen. Durch Überlagerung dieser Selbstrettungsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl im Gefahrenbereich erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen. Nachfolgende Abbildung 12 zeigt exemplarisch die aus einem Benzinbrand im Tunnel Eisgrub (Bauwerk 51/2, Tunnel Süd) aufgrund der sich einstellenden Sichtbedingungen resultierenden Selbstrettungsbereiche.

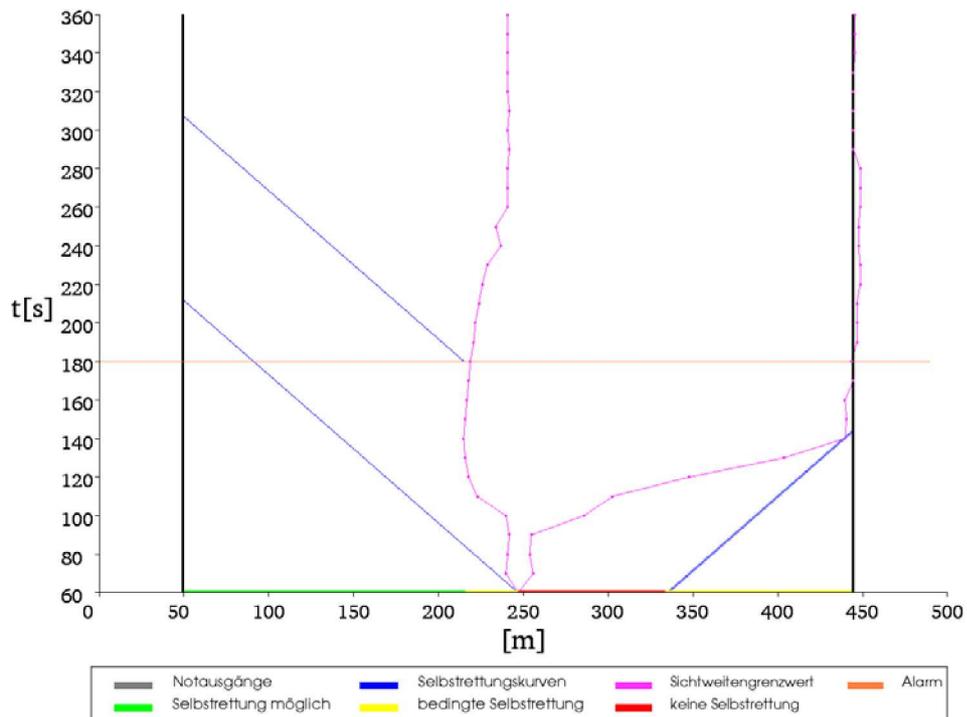


Abbildung 12: Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Tunnel Eisgrub, (Bauwerk 51/2, Tunnel Süd), bei einem 30-MW-Brand (kontinuierliche Freisetzung von Benzin, Stau)

### 6.3.3 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-Diagramm) für jedes Untersuchungszenario ausgewiesen. Ein Beispiel für eine Ergebnisdarstellung in einem HA-Diagramm zeigt nachfolgende Abbildung 13.

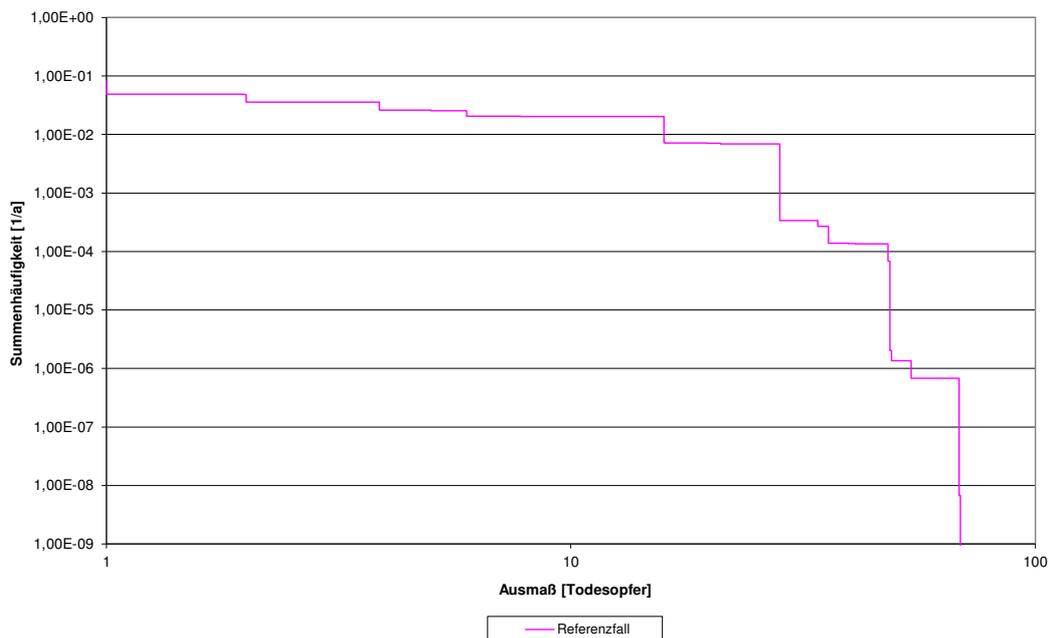


Abbildung 13: Beispiel eines HA-Diagramms

### 6.3.4 Risikobewertung

Die Auswirkungen von risikorelevanten Faktoren auf das Sicherheitsniveau der Tunnelbauwerke werden im Vergleich zum Referenzfall (RABT-konformer Tunnel) quantifiziert und bewertet. Sofern das Sicherheitsniveau des Untersuchungsfalls unter dem des Referenzfalls liegt, sind ggf. weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen in gesonderten Planfällen zu untersuchen. Als Beispiel für eine Bewertung sind in nachfolgender Abbildung 14 Summenhäufigkeitskurven für verschiedene Untersuchungsvarianten dem Sicherheitsniveau eines Referenzfalls (Referenztunnels) gegenübergestellt.

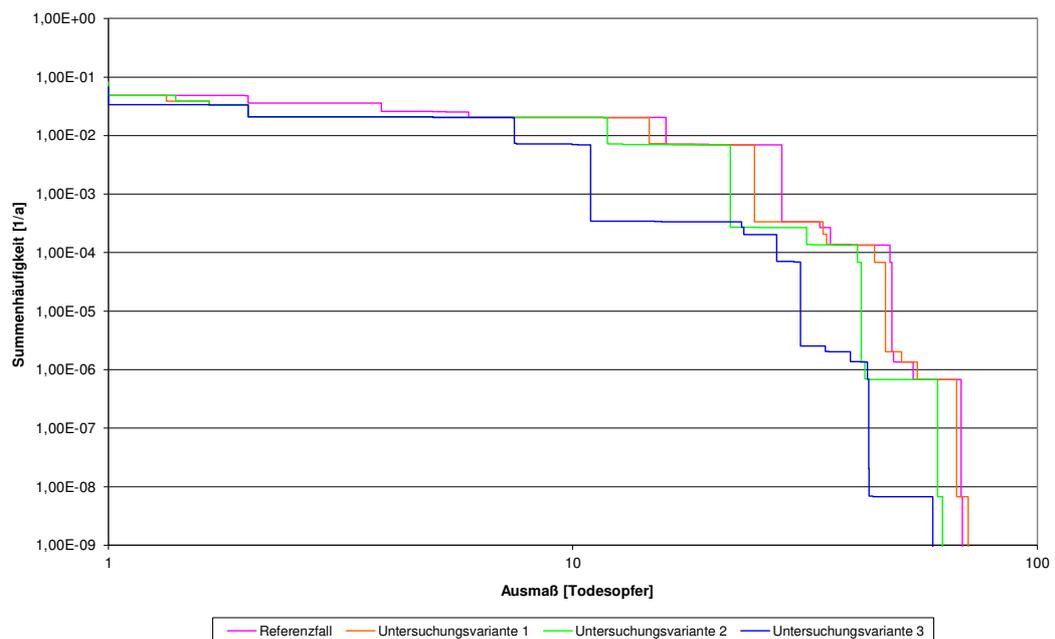


Abbildung 14: Beispiel eines HA-Diagramms zum Vergleich von Referenzfall und Untersuchungsvarianten

## 6.4 Untersuchungsvarianten

Für die nachstehenden Untersuchungsfälle wird das jeweilige Sicherheitsniveau des Modelltunnels mit Hilfe von entsprechenden Simulationsrechnungen verschiedener Untersuchungszenarien bestimmt.

Zu differenzieren ist hierbei zwischen dem RABT-konformen Referenztunnel mit 3 % Längsneigung und dem Untersuchungsfall mit 5 % Längsneigung. Zur transparenten Darstellung der jeweiligen Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau werden die zusätzlichen sicherheitserhöhenden Maßnahmen in einzelnen Planfällen abgebildet.

### 6.4.1 Referenztunnel (RABT-konform)

Der derzeit geplante Tunnel entspricht aufgrund der Längsneigung von 5 % nicht den Empfehlungen der RABT. Im Fall des Referenztunnels (Referenzfall) handelt es sich um einen richtliniengerecht ausgestatteten Richtungsverkehrstunnel ohne Ventilation und einer Längsneigung von maximal 3 %.

### 6.4.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Der Untersuchungstunnel (Untersuchungsfall / Nullfall) unterscheidet sich vom Referenztunnel nur durch seine Längsneigung von 5 %.

Da zu erwarten ist, dass die erhöhte Längsneigung beim Untersuchungstunnel zu einer Erhöhung des Risikos führt, werden in weiteren Planfällen zusätzliche kompensatorische Maßnahmen betrachtet.

### **6.4.3 Untersuchungstunnel + Notausgang (Planfall 1)**

Aufbauend auf dem Untersuchungstunnel (Nullfall) zeigt der Planfall 1 die Auswirkungen von verkürzten Notausgangsabständen auf das zu erwartende Schadensausmaß auf. Es wird die Verbesserung der Fluchtmöglichkeiten im Tunnel durch zusätzliche Notausgänge betrachtet. Der verkürzte Notausgangsabstand ermöglicht den Tunnelnutzern im Ereignisfall schneller sichere Bereiche im Tunnel zu erreichen.

### **6.4.4 Untersuchungstunnel + Geschwindigkeitsreduktion (Planfall 2)**

Im Planfall 2 wird aufbauend auf dem Untersuchungstunnel (Nullfall) der Einfluss einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h auf das Sicherheitsniveau betrachtet. Mit dieser präventiv wirkenden Maßnahme lassen sich die zu erwartenden Unfallraten positiv beeinflussen. Dies wirkt sich günstig auf die Häufigkeit von Unfällen mit und ohne Brandereignissen aus.

### **6.4.5 Untersuchungstunnel + Detektion (Planfall 3)**

Planfall 3 betrachtet die Auswirkungen von zusätzlichen technischen Einrichtungen im Tunnel wie z. B. eine automatische Brandmeldeanlage (Linienbrandmelder oder Videodetektion) in Kombination mit Kommunikations- und Sperreinrichtungen. Damit ergeben sich Verbesserungen bei der Branderkennung und dem Fluchtverhalten von Personen im Tunnel. Durch das Aktivieren von Sperreinrichtungen kann außerdem die weitere Einfahrt in den Gefahrenbereich des Tunnels verhindert werden.

### **6.4.6 Untersuchungstunnel + Notausgang und Detektion (Planfall 4)**

Planfall 4 betrachtet die Auswirkungen von verkürzten Notausgangsabständen/zusätzlicher Notausgang (Planfall 2) in Kombination mit dem Einbau einer Detektionseinrichtung auf das Sicherheitsniveau.

## **6.5 Untersuchungsszenarien**

### **6.5.1 Betriebsart**

Die Tunnelröhren des Tunnel Eisgrub werden im Richtungsverkehr betrieben.

### **6.5.2 Brandort**

Das zu erwartende Schadensausmaß kann maßgeblich durch die Lage des Brandortes beeinflusst werden. Es wird im Rahmen der Untersuchung als Brandort die Tunnelmitte festgelegt. Damit wird ein konservativer Ansatz verfolgt, bei dem ungünstige Verhältnisse für die Risikoermittlung betrachtet werden, indem

die Fluchtwege maximiert werden. In den Planfällen 1 und 4 werden zusätzlich zwei weitere Brandorte berücksichtigt, da bei Brand in Tunnelmitte der dort angenommene Notausgang nicht als Fluchtweg zur Verfügung steht.

### **6.5.3 Brandleistung (5 MW / 30 MW / 100 MW)**

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 dieser Untersuchung werden Brandleistungen von 5, 30 und 100 MW betrachtet. Eine Brandleistung von 5 MW entspricht hierbei einem Pkw-Brand. Einem Bus- oder Lkw-Brand wird eine Brandleistung von 30 MW zugrunde gelegt. Da im Fall eines Lkw-Brandes auch deutlich höhere Energiefreisetzungsraten erreichbar sind, werden darüber hinaus Brandleistungen von 100 MW berücksichtigt. Unter der Annahme, dass in Anlehnung an den Gefahrgutanteil 6 % des Lkw-Verkehrs zu einem 100 MW-Brand führen können und der verbleibende Anteil sich auf Brände mit Brandleistungen von 30 MW verteilt, ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten, dass bei einem Unfall mit Brandfolge ein 5, 30 oder 100 MW-Brand entsteht. Die gleiche Verteilung gilt für die Selbstzünder infolge eines technischen Defekts.

Die Brandentwicklung ist so gewählt, dass die Leistung bis zum jeweiligen Maximum um 1 MW in 1,2 s zunimmt. Das bedeutet beispielsweise, dass ein 100 MW-Brand innerhalb von 2 Minuten sein Maximum erreicht.

### **6.5.4 Verkehrsaufkommen differenziert nach 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 üblicherweise Zeiten mit hohem und mit schwachem Verkehrsaufkommen differenziert betrachtet. Aus den angenommenen Verkehrsbelastungen folgt, dass zwischen 6.00 und 21.00 Uhr 81,25 % des täglichen Gesamtverkehrs den Tunnel passieren. In den Nachtstunden von 21.00 bis 6.00 Uhr liegt der Anteil am Verkehrsaufkommen entsprechend bei 18,75 %.

### **6.5.5 Verkehrszustand (freier Verkehr / Stau)**

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 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 Staus infolge von Überlastung bzw. Störungen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. Hierdurch können Tunnelnutzer beidseitig des Brandherdes der Gefahr von Rauch und Temperatur ausgesetzt sein. Es wird angenommen, dass der Zustand Stau zu 30 h im Jahr auftritt. Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die jeweiligen Verkehrszustände auf.

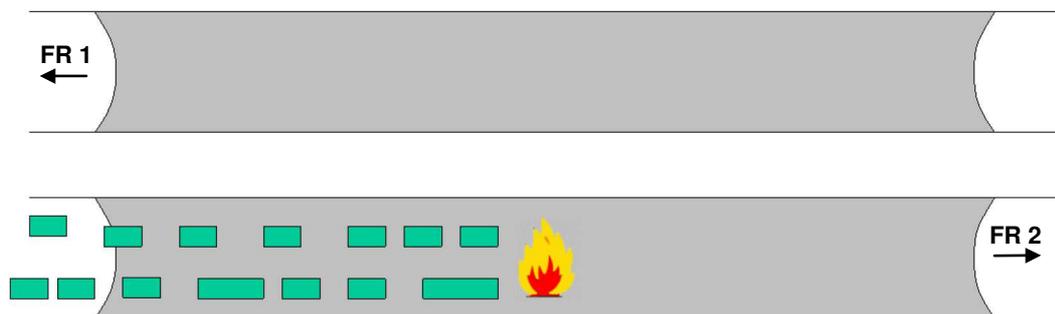


Abbildung 15: Verkehrszustand bei Brandereignis bei primär freiem Verkehrsfluss

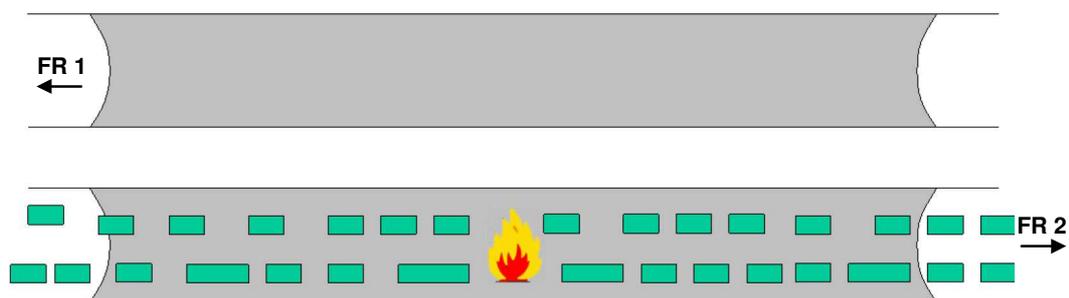


Abbildung 16: Verkehrszustand bei Brandereignis bei Vollstau

### 6.5.6 Alarmierung der Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion und Tunnelsper- rung

Die Alarmierung der Tunnelnutzer im Brandfall sowie das Aktivieren der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen (Tunnelsper-  
rung) haben signifikante Auswirkungen auf das jeweilige Schadensausmaß. Die RABT schreiben automatische Brand-  
meldeeinrichtungen ab einer Länge von 400 m vor. Der vorliegende Tunnel un-  
terschreitet die Länge und besitzt demnach keine Branddetektion.

In den Planfällen 3 und 4 wird zusätzlich eine automatische Brandmeldeanlage in Kombination mit weiteren technischen Maßnahmen (siehe 6.4.5, 6.4.6) vorge-  
sehen.

#### **6.5.7 Aktivierung des Lüftungssystems**

Der Tunnel verfügt über keine mechanische Längslüftung. Der Rauchabtrieb erfolgt über eine natürliche Längslüftung.

#### **6.5.8 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.

#### **6.5.9 Beginn der Fremdrettung**

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Zur Berücksichtigung der Fremdrettung wird in Abhängigkeit von der Eintreffzeit eine Ausmaßminderung angenommen.

#### **6.5.10 Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien**

Die nachfolgende Tabelle 10 fasst die zu untersuchenden Szenarien der einzelnen Untersuchungsfälle zusammen. Sie enthält getrennt nach den Untersuchungsfällen eine Zusammenstellung der im Brandfall maßgeblich den Ereignisablauf und somit das jeweilige Schadensausmaß beeinflussenden Parameter.

Szenarien	Untersuchungsfälle					
	Referenzstunnel RABT-konform	Untersuchungstunnel (Nullfall) 5% LN	Untersuchungstunnel (Planfall 1) NF + NA-Abstand	Untersuchungstunnel (Planfall 2) NF + Geschwindigkeitsre- duktion	Untersuchungstunnel (Planfall 3) NF + Detektion	Untersuchungstunnel (Planfall 4) NF + Notausgang und Detektion
Windeinfluss	3	3	3	3	3	3
Anzahl zu betrachtender Röhren	1	1	1	1	1	1
Betriebszustände (RV / GV)	1	1	1	1	1	1
Abstand Notausgänge	1	1	1	1	1	1
Ereignis mit Kfz-Brand (Ja / Nein)	2	2	2	2	2	2
Brandorte Tunnel	1	1	3	1	1	3
Brandleistung (5 / 30 / 100 MW)	3	3	3	3	3	3
Zeitraum (Tag / Nacht)	2	2	2	2	2	2
Verkehrszustand (Frei / Stau)	2	2	2	2	2	2
Detektion erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	1	2	2
Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	1	1	1
Tunnelsperrung erfolgreich (Ja / Nein)	2	2	2	2	2	2
Aktivierung Lüftungssystem erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	1	1	1
Erhöhtes Ausmaß (Ja / Nein)	2	2	2	2	2	2
Fremdrettung (Ja / Nein)	5	5	5	5	5	5
<b>Anzahl Szenarien/ Endzustände</b>	<b>1.440</b>	<b>1.440</b>	<b>4.320</b>	<b>1.440</b>	<b>2.880</b>	<b>8.640</b>

Tabelle 10: Maßgebende Untersuchungsfälle

Szenarien	Untersuchungsfälle					
	Referenzstunnel RABT-konform	Untersuchungstunnel (Nullfall) 5 % LN	Untersuchungstunnel (Planfall 1) NF + NA-Abstand	Untersuchungstunnel (Planfall 2) NF + Geschwindigkeitsre- duktion	Untersuchungstunnel (Planfall 3) NF + Detektion	Untersuchungstunnel (Planfall 4) NF + Notausgang und Detektion
Windeinfluss	3	3	3	0	0	0
Anzahl zu betrachtender Röhren	1	1	1	0	0	0
Betriebszustände (RV / GV)	1	1	1	0	0	0
Abstand Notausgänge	1	1	1	0	0	0
Ereignis mit Kfz-Brand (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Brandorte Tunnel	1	1	2	0	0	0
Brandleistung (5 / 30 / 100 MW)	3	3	3	0	0	0
Zeitraum (Tag / Nacht)	1	1	1	0	0	0
Verkehrszustand (Frei / Stau)	2	2	2	0	0	0
Detektion erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Tunnelsperrung erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Aktivierung Lüftungssystem erfolgreich (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Erhöhtes Ausmaß (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
Fremdrettung (Ja / Nein)	1	1	1	0	0	0
<b>Anzahl erforderlicher CFD-Simulationen</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabelle 11: erforderliche CFD-Simulationen

## 6.6 Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend werden die Strukturen der im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Ereignisbäume erläutert sowie die Ergebnisse der quantitativen Risikoanalyse vorgestellt.

### 6.6.1 Ermittlung der Häufigkeiten $H_0$ der Initialereignisse

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, Brand infolge Kollision sowie Brand infolge Selbstzündung unterschieden. Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben. In nachfolgender Tabelle 12 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. Für den Referenztunnel nach RABT gelten dann dabei die gemäß Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ anzusetzenden Werte. Die Unfallrate beträgt hier 2,28E-07 pro Jahr.  Für den Tunnel Eisgrub mit einer Längsneigung von 5% wird eine Erhöhung um 20 % angesetzt, dies führt dann zu einer Unfallrate von 2,74E-07.  Als sicherheitserhöhende Maßnahme wird auch eine Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit auf 60 km/h betrachtet. Es wird erwartet, dass hier sich eine Unfallrate ergibt, die dem Referenzfall entspricht.
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den in [SB FE 2009] angegebenen Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Es wird angenommen, dass in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist.
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert auf Grundlage der in [SB FE 2009] hergeleiteten Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1 / Fahrzeug*km].

Tabelle 12: Häufigkeiten  $H_0$  von Initialereignissen

### 6.6.2 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.

#### 6.6.2.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Brand

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

- Fahrzeugtyp (Pkw = 5 MW, Bus / Lkw = 30 MW, Lkw = 100 MW)
- Verkehrsaufkommen (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr / Vollstau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Alarm und Tunnelsperrung erfolgreich (ja / nein)
- Windeinfluss bei natürlicher Lüftung (Windstille / Wind auf oberes Portal / Wind auf unters Portal)
- Erhöhtes Ausmaß (Reisebus ja / nein)
- Fremdrettung

Im vorliegenden Fall des Tunnel Eisgrub treten jedoch nicht alle Verzweigungspunkte in den einzelnen Untersuchungsvarianten auf. Beispielsweise sind nicht in allen Untersuchungsfällen automatische Brandmeldeeinrichtungen vorhanden, die eine automatische Detektion ermöglichen. Die zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände erforderlichen Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufes werden in nachfolgender Tabelle 13 näher erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung	
[1]	5 MW / 30 MW / 100 MW	Gemäß den vorgegebenen Verkehrswerten mit 20,0 % Lkw-Anteil wird für die Tunnel Eisgrub von folgender Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgegangen. Die gleiche Verteilung gilt für die Selbstzündung infolge eines technischen Defekts.	
		5 MW	80,0 %
		30 MW	18,8 %
		100 MW	1,2 %
[2]	Verkehrsaufkommen pro Zeitintervall Tag / Nacht	Das Verkehrsaufkommen ist tageszeitabhängig. Der Zeitpunkt eines Brandes hat deshalb einen Einfluss auf das zu erwartende Ausmaß Da für den Tunnel Eisgrub keine detaillierten Prognosewerte für die Zeitintervalle Tag/Nacht vorliegen, wurden Abschätzungen vorgenommen. Für die Tunnel Eisgrub sind am Tag 81,25 % und in der Nacht 18,75 % des Gesamtverkehrsaufkommens berücksichtigt.	
[3]	Verkehrszustand Fließender Verkehr / Vollstau	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist direkt abhängig vom vorherrschenden Verkehrszustand. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Auf Basis der [VU 2015] wird für den Zeitraum der Tunnelerrichtung die Annahme getroffen, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 %, d. h. in ca. 30 h /Jahr Vollstau im Tunnel eintritt. Freier Verkehr ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,66 % zu erwarten.	

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung																					
[4]	Detektion Ja / Nein	<p>Die Tunnel besitzen keine automatischen Detektionseinrichtungen. Personen im Tunnel müssen damit selbst die Gefährdung durch ein Brandereignis erkennen und sich zur Flucht begeben. Es werden hier Zeiten von 2 Minuten nach Brandbeginn angenommen, ab denen Personen sich zur Flucht begeben.</p> <p>Im Untersuchungsfall mit Detektion fordern die RABT eine Erkennung innerhalb von 60 s über automatische technische Systeme, die aber auch versagen können.</p> <p>Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99 % innerhalb von 60 s erfolgt. In dem verbliebenen 1 % der Fälle wird ein Brand nicht erkannt.</p>																					
[5]	Tunnelsperrung Ja / Nein	<p>Im derzeitigen Planungsstand weisen die Tunnel keine Sperreinrichtungen auf. Es wird daher angenommen, dass Fahrzeuge solange einfahren, bis Rauch aus dem Portal tritt.</p> <p>Im Falle einer Berücksichtigung einer Sperreinrichtung als zusätzliche Maßnahme gilt folgende Annahme, dass die Sperreinrichtung infolge von Brandeinwirkungen auf andere technische Systeme im Tunnel oder infolge technischer Probleme nicht ordnungsgemäß funktioniert und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in einem von hundert Fällen eintritt.</p>																					
[6]	Lüftungssystem Ja / Nein	<p>Die Belüftung der Tunnelröhren erfolgt ausschließlich durch eine natürliche Ventilation. Ausgehend von Auswertungen der zur Verfügung stehenden Windverteilungen wird davon ausgegangen, dass in 29,76 % der Fälle Windstille vorherrscht. Eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,0 m/s ist mit einer Wahrscheinlichkeit von zu 29,69 % auf das tieferliegende Portal und zu 40,55 % auf das höherliegende Portal zu erwarten.</p>																					
[7]	Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	<p>Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Nach Abwägen zwischen Erfassungsgenauigkeit der Dauerschälstelle und Verlässlichkeit der zeitlich begrenzten Messung wird auf der sicheren Seite liegend von in 0,5% der Fälle davon ausgegangen, dass 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.</p>																					
[8]	Fremdrettung	<p>Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Zur Berücksichtigung der Fremdrettung wird in Abhängigkeit von der Eintreffzeit eine Ausmaßminderung vorgenommen. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Eintreffzeit</th> <th>Eintreffwahrscheinlichkeit</th> <th>Ausmaßminderung</th> </tr> <tr> <th>[min]</th> <th>[%]</th> <th>[%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 5</td> <td>0</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>&lt; 10</td> <td>80</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>&lt; 15</td> <td>19</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>&lt; 20</td> <td>0,9</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>≥ 20</td> <td>0,1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Eintreffzeit	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung	[min]	[%]	[%]	< 5	0	30	< 10	80	20	< 15	19	10	< 20	0,9	5	≥ 20	0,1	0
Eintreffzeit	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung																					
[min]	[%]	[%]																					
< 5	0	30																					
< 10	80	20																					
< 15	19	10																					
< 20	0,9	5																					
≥ 20	0,1	0																					

Tabelle 13: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes

6.6.2.2 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 in einem Richtungsverkehrstunnel)
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall  
(z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Nachfolgende Tabelle 14 gibt die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für die Tunnel Eisgrub in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensausmaß wieder.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung						
[1] Unfalltyp	Basierend auf dem Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln und Abschätzungen für das erhöhte Unfallaufkommen infolge der erhöhten Längsneigung wird für den Tunnel Eisgrub von folgender Verteilung nach Unfalltypen ausgegangen. Im Planfall mit reduzierter Geschwindigkeit werden ebenfalls die Grundwerte des Forschungsberichtes angesetzt:						
		<b>Referenz-tunnel</b> <small>RABT-konform</small>	<b>Untersuchungs-tunnel (NF)</b> <small>5 % LN</small>	<b>Untersuchungs-tunnel (PF 1)</b> <small>NF + NA-Abstand</small>	<b>Untersuchungs-tunnel (PF 2)</b> <small>NF + Geschwindigkeitsreduktion</small>	<b>Untersuchungs-tunnel (PF3)</b> <small>NF + Detektion</small>	<b>Untersuchungs-tunnel (PF 4)</b> <small>NF + Notausgang und Detektion</small>
	Unfalltyp 1	46,2 %	46,79 %	46,79 %	46,2 %	46,79 %	46,79 %
	Unfalltyp 3	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
	Unfalltyp 6	23,1 %	27,56 %	27,56 %	23,1 %	27,56 %	27,56 %
	Unfalltyp 7	30,8 %	25,65	25,65 %	30,8 %	25,65	25,65
[2] Ausmaßverteilung	Gemäß [SB FE 2009] 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		

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung		
	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 14: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision

### 6.6.3 Ermittlung der Schadensausmaße

#### 6.6.3.1 Schadensausmaße infolge Brand

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<sup>3</sup>. 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. Über die Verknüpfung mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich anschließend für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenanzahlen bestimmen.

#### 6.6.3.2 Schadensausmaße infolge Kollision

Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird auf Grundlage des in [SB FE 2009] vorgegebenen Zusammenhangs gemäß nachfolgender Tabelle 15 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 15: Schadensausmaße infolge Kollision

### 6.6.4 Risikoermittlung und Risikobewertung (Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm)

Zur Bestimmung und Darstellung der Risiken werden die in den vorausgehenden Kapiteln 6.6.1 und 6.6.2 ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und die jeweils zugehörigen Schadensausmaße nach Kapitel 0 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 den Tunnel zu erhalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse in schon aggregierter Form dargestellt.

---

<sup>3</sup> [ASR 2006]

In Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung als Summenhäufigkeitskurven der Gesamtrisiken für den Referenzstunnel sowie für den Untersuchungstunnel im Nullfall als auch den betrachteten Planfällen für die Ereignisse infolge Unfalls und Brand überlagert dargestellt.

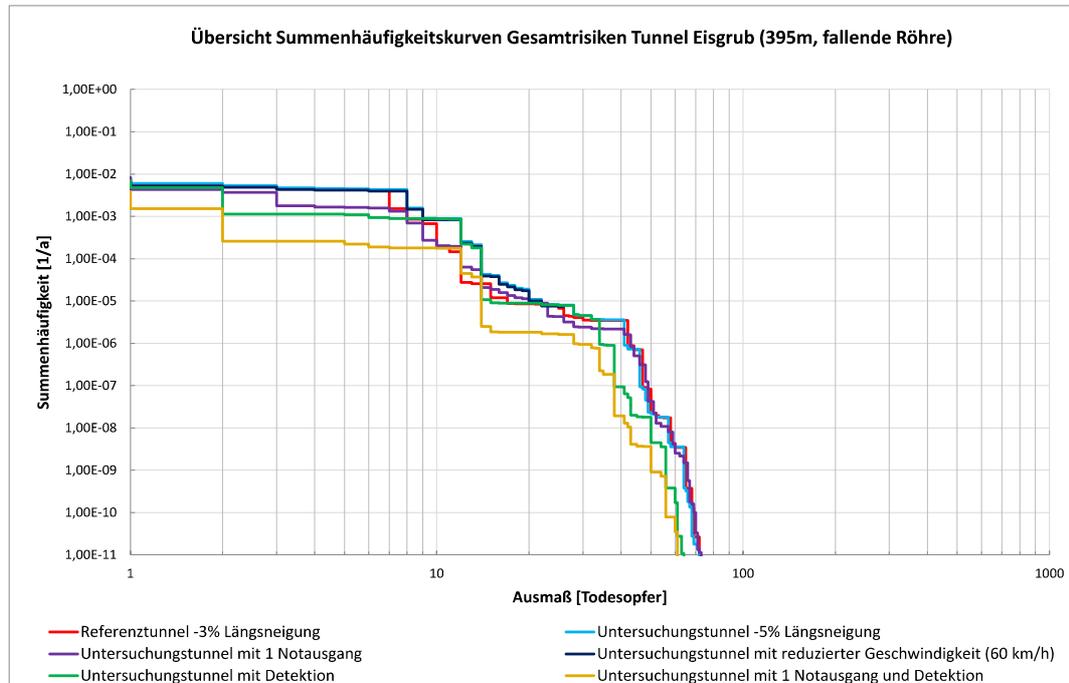


Abbildung 17: Schadensausmaße infolge Unfalls und Brand

In der folgenden Tabelle 16 sind die Punktrisikowerte (Schadenerwartungswerte und bewertete Risiken) der verschiedenen Untersuchungsvarianten (Referenzfall sowie Untersuchungstunnel im Nullfall und Planfällen) in einer tabellarischer Form vergleichend gegenübergestellt. Daraus wird ersichtlich, dass sowohl durch einen zusätzlichen Notausgang als auch durch eine automatische Branderkennung und einer Alarmierung der Tunnelnutzer über Lautsprecher ein höheres Sicherheitsniveau als im Referenzfall erreicht wird. Durch Kombination der beiden Maßnahmen wird ein Sicherheitsniveau erzielt, das 83,4 % über dem des Referenzfalles liegt. Im Hinblick auf die Zulässigkeit von Gefahrguttransporten (vgl. Abschnitt 7) im Tunnel Eisgrub wird die Kombination der beiden Maßnahmen empfohlen.

Szenarien		Risikowerte [-] Risikodifferenz zum Referenzunnel [%]					
		Referenzunnel RABT-konform	Untersuchungstunnel (Nullfall) 5 % LN	Untersuchungstunnel (Planfall 1) NF + NA-Abstand	Untersuchungstunnel (Planfall 2) NF + Geschwindigkeitsre- duktion	Untersuchungstunnel (Planfall 3) NF + Detektion	Untersuchungstunnel (Planfall 4) NF + Notausgang und Detektion
Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]	Unfall	0,00294 -	0,00384 + 30,7 %	0,00384 + 30,7 %	0,00294 ± 0,0 %	0,00384 + 30,7 %	0,00384 + 30,7 %
	Brand infolge Unfall	0,00675 -	0,00933 + 38,2 %	0,00476 -29,6 %	0,00777 + 15,1 %	0,00395 -41,5 %	0,00080 -88,2 %
	Brand infolge techn. Defekt	0,02962 -	0,03410 + 15,1 %	0,01739 -41,3 %	0,03410 + 15,1 %	0,01443 -51,3 %	0,00292 -90,1 %
	Gesamtrisiken Brand	0,03637 -	0,04343 + 19,4 %	0,02215 -39,1 %	0,04187 + 15,1 %	0,01838 -49,5 %	0,00372 -89,8 %
	Gesamtrisiken Unfall und Brand	0,03931 -	0,04727 + 20,3 %	0,02599 -33,9 %	0,04481 + 14,0 %	0,02222 -43,5 %	0,00756 -80,8 %
bewertetes Risiko [Getötete/Jahr]	Unfall	0,00356 -	0,00466 + 30,9 %	0,00466 + 30,9 %	0,00356 ± 0,0 %	0,00466 + 30,9 %	0,00466 + 30,9 %
	Brand infolge Unfall	0,01870 -	0,02796 + 49,5 %	0,01203 -35,7 %	0,02330 + 24,6 %	0,01108 -40,8 %	0,00224 -88,0 %
	Brand infolge techn. Defekt	0,08202 -	0,10220 + 24,6 %	0,04397 -46,4 %	0,10220 + 24,6 %	0,04049 -50,6 %	0,00820 -90,0 %
	Gesamtrisiken Brand	0,10073 -	0,13016 + 29,2 %	0,05600 -44,4 %	0,12550 + 24,6 %	0,05156 -48,8 %	0,01044 -89,6 %
	Gesamtrisiken Unfall und Brand	0,10428 -	0,13481 + 29,3 %	0,06066 -41,8 %	0,12905 + 23,8 %	0,05622 -46,1 %	0,01510 -85,5 %

Tabelle 16: Vergleichende Gegenüberstellung der für den Tunnel Eisgrub Bauwerk 51/2 (Tunnel Süd) ermittelten Risikowerte

## 6.7 Empfehlungen

Die Risikoanalyse für den 395 m langen Tunnel (fallende Röhre) zeigt, dass zusätzliche sicherheitserhöhende Maßnahmen die Längsneigung von 5 % kompensieren können und ein RABT-konformes Sicherheitsniveau erreicht werden kann.

Ohne Maßnahmen liegt das Risiko des Untersuchungstunnels (Nullfall) 20 % über dem des RABT-konformen Referenztunnels mit 3 % Längsneigung. Die Errichtung eines Notausganges in der Tunnelmitte senkt das Risiko soweit, dass das Vergleichsrisiko um 34 % unterschritten wird.

Die Berücksichtigung einer automatischen Branderkennung innerhalb von 60 s gemäß RABT und Alarmierung der Tunnelnutzer über Lautsprecher führt zu einem noch besseren Ergebnis, zu einer Reduktion um 44 %. Da der Tunnel aufgrund der großen Längsneigung schnell verrauchet, treten ohne Alarmierung große Gefährdungsbereiche im Tunnel auf.

Die Überlagerung beider Maßnahmen führt zu sehr deutlichen Sicherheitsgewinnen. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der parallel durchgeführten Gefahrgutanalyse wird die Errichtung mindestens eines Notausgangs empfohlen in Kombination mit einer automatischen Brandmeldeanlage und Alarmierung der Tunnelnutzer.

Die Reduktion der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 60 km/h in einem weiteren Untersuchungsfall reicht hingegen nicht aus, um das notwendige Sicherheitsniveau zu erreichen. Sie würde aber als Zusatzmaßnahme zu weiteren Sicherheitsgewinnen führen.

Die getroffenen Aussagen lassen sich auf die Tunnelröhren Nord übertragen. Auch hier ergeben sich infolge der größeren Längsneigung Risiken, die über dem Niveau eines RABT-konformen Tunnels liegen, so dass auch hier die Berücksichtigung von Zusatzmaßnahmen erforderlich wird. Aufgrund der Tunnellänge, die den Notausgangsabstand von 300 m gemäß RABT bereits unterschreitet, wird hier nur die Berücksichtigung der zusätzlichen sicherheits-technischen Ausstattung empfohlen.

## 7 Risikoanalyse Gefahrguttransporte (Kategorisierung)

### 7.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

In der zum Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd) aufgrund der Abweichung vom Regelwerk durchgeführten quantitativen Risikoanalyse (siehe Abschnitt 6) konnte gezeigt werden, dass durch die Anordnung eines zusätzlichen Notausgangs in Tunnelmitte in Kombination mit einer Brandmeldeeinrichtung, einer Lautsprecheranlage sowie einer Tunnelsperreinrichtung ein deutlich höheres Sicherheitsniveau erzielt werden kann, als ein Tunnel, der nach RABT ausgestattet ist und eine Längsneigung von 3 % aufweist. In den Tunnelröhren Nord wird ebenfalls die Berücksichtigung zusätzlicher sicherheitstechnischer Ausstattung empfohlen. Auf die Anordnung eines zusätzlichen Notausgangs kann aufgrund der geringen Tunnellänge (< 300 m) verzichtet werden.

Für die Tunnel Eisgrub ist eine Kategorisierung gemäß ADR 2007 vorzunehmen. Gegenstand dieser Untersuchung ist die Durchführung einer vertieften Analyse entsprechend der Stufe 2a nach dem „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“. Grundlage für diese Untersuchung bildet die vorgeschlagene Tunnelausstattung vorangegangener Risikoanalyse. Die Berechnungen erfolgen für die kritischste Röhre. Durch Analogieschlüsse können anschließend Aussagen über die weiteren Tunnelröhren getroffen werden.

Zur Beurteilung des Einflusses von Gefahrguttransporten auf die Sicherheit im Tunnel Eisgrub und damit der Zulässigkeit solcher Transporte sind grundsätzlich andere Szenarien zu betrachten. Hierzu zählen neben der Freisetzung von großen Benzinmengen, Freisetzungen von druckverflüssigten Gasen (Propan etc.) und Schadgasen (Chlor etc.) sowie die Umsetzung von Explosivstoffen (TNT etc.). Die Betrachtung derartiger Ereignisse erfordert die Durchführung von gesonderten Risikoanalysen (Gefahrgutanalysen) entsprechend dem Verfahren des Bundes und der Länder zur Kategorisierung von Straßentunneln gem. ADR [FE ADR 2009]. Mit Hilfe der Untersuchung kann der Bestandstunnel einer oder mehreren Tunnelkategorien zugeordnet werden, über die eine Freigabe für alle Gefahrguttransporte oder eine Beschränkung für Teile bis hin zum Verbot aller Transporte ausgesprochen werden kann.

Grundlage für diese Untersuchung bildet die vorgeschlagene Tunnelausstattung einschließlich der Zusatzmaßnahmen der vorangegangenen quantitativen Risikoanalyse.

## 7.2 Untersuchungsgrundlagen

In nachfolgender Tabelle 17 sind die maßgeblichen Parameter zu den Tunneln Eisgrub zusammengefasst.

Tunnelparameter	Bauwerk BW51/1 (Tunnel Nord)	Bauwerk BW51/2 (Tunnel Süd)
Verkehrsart	Richtungsverkehr (RV)	
Anzahl Tunnelröhren	2	
Anzahl Fahrstreifen pro Fahrrichtung je Röhre	2	
Standstreifen	-	
Notgehwege	1,00 m beidseits der Fahrbahn	
Tunnellänge	255 m	395 m (ggf. 500 m)
Bauweise	Offene und bergmännische Bauweise	
Regelquerschnitt lichte Bauhöhe: lichte Breite	RQ31t 7,04 m mind. 9,50 m	
Längsneigung	5 % (FR Süd), -5 % (FR Nord)	
Lüftungssystem	natürliche Ventilation (RABT-konform, da < 400 m)	
Bemessungsbrandleistung	30 MW (nur zur Auslegung von mechan. Lüftungsanlagen relevant)	
Entwässerung	Die Entwässerung der Fahrbahn über Schlitzrinnen am jeweils tieferliegenden Fahrbahnrand	
Notausgangsabstand	255 m (da kein Notausgang geplant)	197,5 m (Notausgang in Tunnelmitte)
Kommunikationseinrichtungen	Notrufsprechstellen an den Tunnelportalen	
Überwachungseinrichtungen	Keine (RABT-konform, da < 400 m)	
Tunnelsperranlage	WLZ Rot/Gelb am Tunnelportal Tunnelsperrschranke	
Brandmeldeeinrichtung	automatische Brandmeldeanlage	
Alarmierung der Tunnelnutzer	Lautsprecheranlage	
Besonderheiten	Längsneigung >> 3%	
Verkehrsdaten		
Verkehrsbelastung DTV	19.300 Kfz/24h	
Schwerverkehrsanteil (SV)	20 %	
Gefahrgutanteil am SV	6 %	

Tabelle 17: Kenngrößen der Tunnel Eisgrub

## 7.3 Untersuchungsszenarien

Nach dem „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“ sind pro Leitstoff jeweils zwei unterschiedliche Szenariengrößen bzw. -abläufe zu betrachten. Insgesamt ergeben sich somit 8 Grundszenarien. Jedem dieser Grundszenarien ist in Abhängigkeit der im ADR definierten Hauptgefahren ein Tunnelbeschränkungscode zugeordnet. Im Fall von Benzin-, Propan- und Chlorfreisetzungen wird jeweils noch zwischen einer spontanen und kontinuierli-

chen Freisetzung unterschieden. Daraus resultieren 14 unterschiedliche Freisetzungsszenarien.

Hinsichtlich des zu betrachtenden Tunnels wurde aufgrund durchgeführter Voranalysen der Tunnel Süd mit einer Länge von 395 m ausgewählt. Durch die Tunnellänge ergeben sich bei einem Ereignisort in der Tunnelmitte größere Gefährdungsbereiche für Tunnelnutzer. Zudem sind auch die zurückzulegenden Fluchtwege erhöht. Bedingt durch die Tunnellänge befinden sich auch statistisch mehr Fahrzeuge im Tunnel Süd bei gleicher Verkehrsbelastung, so dass die detaillierte Kategorisierung für den Tunnel Süd vorgenommen wurde.

Sämtliche Freisetzungsszenarien sind nach dem „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“ mit hierfür geeigneten Simulationsprogrammen abzubilden. Eine hiervon abweichende Betrachtung kann zu einer falschen Kategorisierung der Tunnel führen.

Nachfolgende Tabelle 18 enthält eine Zusammenstellung der nach dem „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“ zu betrachtenden Szenarien.

Leitstoff	Szen.-Nr.	Freisetzungsart	Freigesetzte Menge	Berücksichtigte Ausbreitungs- und Wirkungsarten	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR	Tunnelkategorie nach ADR
Benzin	1	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund <b>20 m<sup>3</sup></b> mit einer Rate von <b>300 kg/s</b> bzw. <b>20,6 kg/s</b> .	15 t	Sofortige Zündung und Lachenbrand Lachenbildung und verzögerte Zündung Rauchgasausbreitung	große Brandgefahr	D
	2	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund <b>10 m<sup>3</sup></b> mit einer Rate von <b>300 kg/s</b> bzw. <b>20,6 kg/s</b> .	8 t	Sofortige Zündung und Lachenbrand Lachenbildung und verzögerte Zündung Rauchgasausbreitung	-	E
Propan	3	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von <b>400 kg/s</b> bzw. <b>30 kg/s</b>	12 t	Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand	sehr große Explosionsgefahr	B
	4	Transport in Kleingebinden, spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von <b>400 kg/s</b> bzw. <b>30 kg/s</b> .	1 t	Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand	große Brandgefahr	D

Leitstoff	Szen.-Nr.	Freisetzungsart	Freigesetzte Menge	Berücksichtigte Ausbreitungs- und Wirkungsarten	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR	Tunnelkategorie nach ADR
Chlor	5	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von <b>4 t</b> mit einer Rate von <b>45 kg/s</b> bzw. <b>400 kg/s</b>	4 t	Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen	Freisetzung giftiger Stoffe	C
	6	Transport in Kleingebinden, spontane oder kontinuierliche Freisetzung von <b>50 kg</b> mit einer Rate von <b>45 kg/s</b> bzw. <b>400 kg/s</b>	50 kg*	Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen	-	E
TNT	7	Transport von <b>1.000 kg</b> TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	1 t	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)	sehr große Explosionsgefahr	B
	8	Transport von <b>100 kg</b> TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	100 kg	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)	große Explosionsgefahr	C

\* Vereinfachend wird von einer Freisetzungsmenge von 50 kg des Leitstoffes ausgegangen.

Tabelle 18: Überblick über Untersuchungsszenarien zur Abbildung der Kategorien gemäß ADR

## 7.4 Vorgehensweise

Die Stufe 2a dient dazu, einen Straßentunnel gemäß den Kategorien A - E nach ADR 2007 einzustufen. Die Zuordnung einer entsprechenden Tunnelkategorie erfolgt durch Bewertung der zu erwartenden Risiken mittels einer Vergleichsgrenze. Die Quantifizierung der objektspezifischen Risiken erfordert in einem ersten Schritt die Generierung von Ereignisabläufen zur Häufigkeitsermittlung. In einem zweiten Schritt sind dann für die jeweiligen Häufigkeiten Schadensausmaße mittels Modellrechnungen zu bestimmen. Durch die Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen lassen sich schließlich die Risiken szenarioabhängig ermitteln.

Der prinzipielle Ablauf einer quantitativen Risikoanalyse in Abbildung 18 dargestellt. Die einzelnen Verfahrensschritten und Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung werden nachfolgend kurz erläutert.

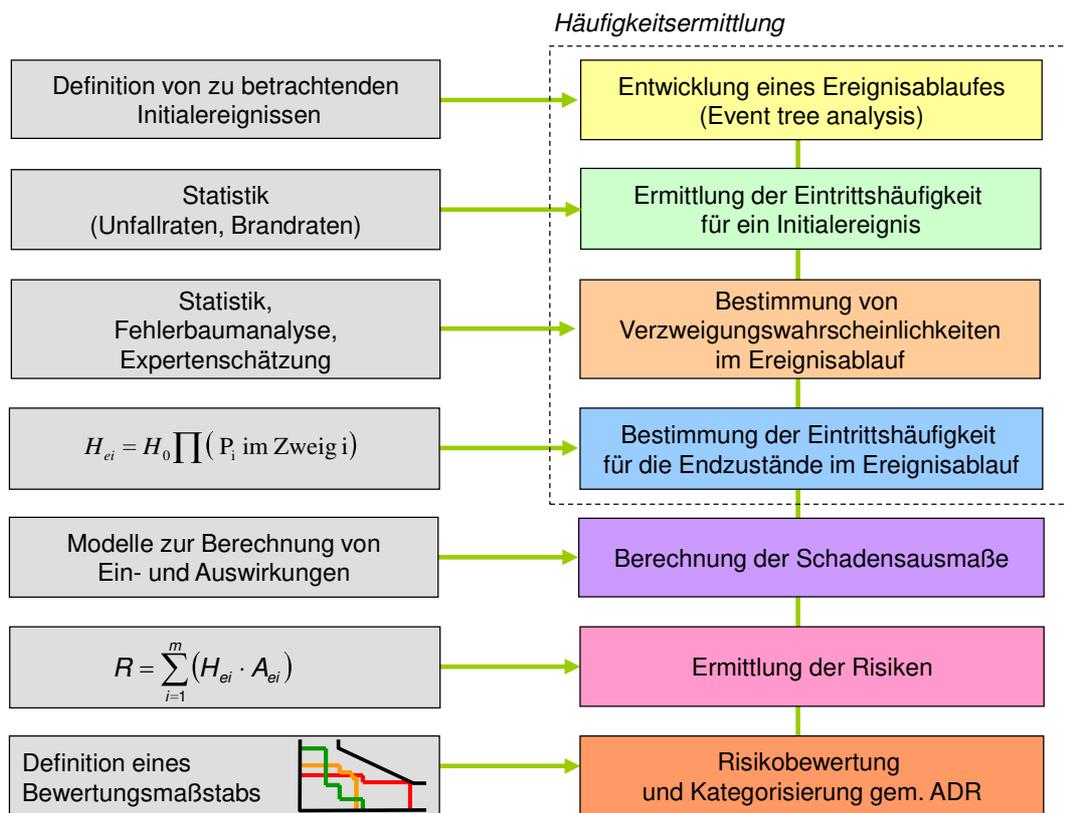


Abbildung 18: Ablauf einer Risikoanalyse und Risikobewertung

## 7.5 Häufigkeitsermittlung

### 7.5.1 Definition von auslösenden Ereignissen

Das Spektrum der transportierten Gefahrgüter und der verschiedenen Wirkarten sowie der transportierten Mengen und Transportgebilde ist ausgesprochen breit und kann im Rahmen einer Risikoanalyse nicht vollständig abgedeckt werden. Aus diesem Grund werden mittels repräsentativer Stoffe so genannter Leitstoffe die maßgebenden Gefahrgutwirkungen abgebildet. Diese Stoffe stehen dabei stellvertretend für alle Stoffe, deren maßgebliche Gefahrgutwirkung vergleichbar ist. Die Hauptgefahrgutwirkungen, welche gemäß der in der ADR vorgegebenen Kategorisierung aus Blickwinkel der (Personen-)Risiken berücksichtigt werden müssen, sind:

- Explosions-/Druckwirkung
- Toxizität
- Brandwirkung

Um im Hinblick auf die zu berücksichtigenden Gefahrgutwirkungen Abstufungen in den Tunnelkategorien A,B,C,D,E nach ADR zu erhalten, werden stellvertretend

für die Gesamtheit aller hinsichtlich Personenschäden relevanter Gefahrgüter für die Risikoanalyse und Risikobewertung folgende vier Leitstoffe verwendet:

- Benzin
- Propan
- Chlor
- Trinitrotoluol

Durch diese 4 Leitstoffe werden die Gefahrgutklassen 1, 2 und 3 nach ADR abgedeckt.

### 7.5.2 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. Wesentliche Verzweigungspunkte im Ereignisablauf zur Kategorisierung nach ADR bilden hierbei:

- Freisetzungsmenge
- Art der Freisetzung (spontan, kontinuierlich)
- Zündung (sofort, verzögert, keine)
- Ereignisort (Einfahrtsbereich, Tunnelinnenstrecke)
- Verkehrsaufkommen (Tag /Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr, Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion ja /nein
- Sperreinrichtung aktiviert (ja / nein)
- Windeinfluss (Windstille, mittlere Windgeschwindigkeiten)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja /nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Beginn der Fremdrettung

Im Einzelfall müssen nicht unbedingt alle Verzweigungspunkte vorhanden bzw. belegt sein. Abbildung 10 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

### 7.5.3 Ermittlung der Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis

Als Grundlage für die Bestimmung der Eintrittshäufigkeit von Gefahrgutfreisetzungungen werden die für das bundesdeutsche Straßennetz nach Straßentyp und Gefahrgutklasse ermittelte Freisetzungsraten gewählt. Für Bundesautobahnen gelten nach dem Verfahren zur Kategorisierung nach ADR 2007 die in nachfolgender Tabelle 19 aufgeführten Freisetzungsraten.

	Freisetzungsraten [1/10 <sup>8</sup> Fz-km]		
Gefahrgut	GG-Klasse 1	GG-Klasse 2	GG-Klasse 3
Außerorts	0,42	0,15	2,67

Tabelle 19: Freisetzungsraten der betrachteten Gefahrgutklassen für Außerortsstraßen (freie Strecke)

Untersuchungen für das deutsche Straßennetz zeigen, dass die Gefahrgutklasse 1 etwa 1 % des gesamten Gefahrguttransportes umfasst. Sie enthält hauptsächlich TNT-Transporte. Chlor und Propan umfassen 4 % resp. 20 % der Transporte der Gefahrgutklasse 2, welche selbst 15 % des gesamten Gefahrguttransportes ausmacht. Der Anteil von Benzintransporten an der Gefahrgutklasse 3 umfasst 30 %. Mit einem Anteil von 68 % am gesamten Gefahrguttransportaufkommen ist die Klasse 3 die anteilig größte Gefahrgutklasse.

Die Leitstoffe enthalten neben den namengebenden Stoffen weitere Vertreter aus derselben Gefahrgutklasse, sofern sie vergleichbare Stoffeigenschaften bzw. ähnliche Auswirkungen im Falle einer Freisetzung aufweisen und in relevanter Menge transportiert werden. Die zusätzlichen Stoffe werden berücksichtigt, indem die beschriebenen Anteile der transportierten Stoffe mit einem Faktor korrigiert werden.

In Abhängigkeit des Anteils der jeweiligen Gefahrgutklasse am gesamten Gefahrgutverkehr ergeben sich die Anteile der Leitstoffe an allen GG-Fahrten. In nachfolgender Tabelle 4 sind die entsprechenden Anteile zusammengefasst.

Leitstoff	GG-Klasse	Anteil am GG-Verkehr	Wichtigste Vertreter	Anteil an Gefahrgutklasse	Faktor zur Berücksichtigung der anderen Vertreter	Leitstoffanteil an allen GG-Fahrten
Benzin	3	68 %	- Benzin - Heizöl (bzw. Diesel)	30 % 66 %	1,2	24,48 %
Propan	2	15 %	- Propan - Butan und weitere Vertreter	20 % 4 %	1,25	3,75 %
Chlor			- Chlor - Ammoniak u. a.	4 % 5 %	2,3	1,38 %
TNT	1	1 %	Diverse Explosivstoffe	100 %	1,0	1,00 %

Tabelle 20: Berücksichtigung weiterer Stoffe mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. möglichen Wirkungen an den Leitstoffen

Statistisch gesehen ist eine Tunnelstrecke weniger unfallgefährdet als die freie Strecke. Gemäß [TAC 1998] ist im Bereich der Tunnelinnenstrecke gegenüber der freien Strecke eine um 1/3 niedrigere Unfallrate zu erwarten. Im Vergleich zur Tunnelinnenstrecke weist jedoch die Einfahrtsstrecke eine um ca. 10 % höhere Unfallrate auf. Die Unfall- und Freisetzungsraten der freien Strecke werden daher entsprechend dieser Verteilung auf die verschiedenen Streckenbereiche (Portalbereich, Innenbereich) angepasst.

- Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen
- Verkehrsaufkommen (DTV)
- Schwerverkehrsanteil (SV)
- Gefahrgutanteil
- Verhältnis Tunnelinnenstrecke / Portalbereich
- Anteil des Leitstoffes an allen Gefahrgutfahrten

ergeben sich für die Tunnel Eisgrub die in Tabelle 21 aufgeführten Eingangsgrößen für die jeweiligen Leitstoffe:

Leitstoff	Freisetzungshäufigkeiten/Jahr			
	Benzin	Propan	Chlor	TNT
Tunnel Eisgrub	$1,89 \times 10^{-4}$	$1,63 \times 10^{-6}$	$5,85 \times 10^{-7}$	$1,21 \times 10^{-6}$

Tabelle 21: Leitstoffbezogene Freisetzungshäufigkeiten für die Tunnel Eisgrub

#### 7.5.4 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 Verzweigungswahrschein-

lichkeiten  $P_i$  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.

#### 7.5.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisablauf infolge einer Benzinfreisetzung

In nachfolgender Tabelle 22 sind die den Ereignisablauf infolge einer Benzinfreisetzung beeinflussenden Verzweigungen einschließlich der zugrunde liegenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten zusammenfassend beschrieben.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	Initialereignis	Beim Initialereignis handelt es sich um die Freisetzungshäufigkeit des Leitstoffes Benzin in relevanter Menge. Der eingesetzte Wert entstammt den Ausführungen gemäß dem Verfahren zur Kategorisierung nach ADR 2007. Der Wert des Initialereignisses ist abhängig von der Fahrleistung der Benzintransporte im Untersuchungstunnel, einem Korrekturfaktor um die Unfallrate der freien innerstädtischen Strecke auf den Tunnel zu übertragen und der relevanten Freisetzungsrates des repräsentativen Leitstoffes Benzin.
[2]	Freisetzungsmenge: groß / klein	Es wird angenommen, dass es sich bei 95 % der Freisetzungen nach einem Unfall um eine kleine Freisetzung handelt. Nur in 5 % der Fälle treten große Mengen an Benzin aus.
[3]	Freisetzungsart: spontan / kontinuierlich	Die Freisetzungsart richtet sich nach dem Maß der Beschädigung der den Leitstoff Benzin beinhaltenden Behälter. Kommt es zum spontanen Versagen (einem Aufplatzen) tritt die Ladung innerhalb weniger Sekunden aus. Im Falle eines kontinuierlichen Versagens wird nur ein kleiner Bereich beschädigt. Beim damit auftretenden Leck tritt der Leitstoff innerhalb von Minuten bis Stunden aus. Gemäß der Kategorisierung nach ADR 2007 wird für den Leitstoff Benzin eine spontane Freisetzung nur in 10 % der Fälle angenommen, eine kontinuierliche dementsprechend zu 90 %.
[4]	Zündung: sofort / verzögert	Zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeiten werden als Grundlage für die Kategorisierung gemäß ADR internationale Unfalldaten statistisch ausgewertet. Es ergeben sich daraus folgende Wahrscheinlichkeiten, die für die Berechnungen verwendet werden: <u>Spontane Freisetzungen:</u> - Zündung sofort: 35 % - Zündung verzögert: 5 % - keine Zündung: 60 % <u>Kontinuierliche Freisetzungen:</u> - Zündung sofort: 15 % - Zündung verzögert: 5 % - keine Zündung: 80 %
[5]	Ereignisort	Der Ereignisort wird in der fallenden Röhre des Bauwerks BW51/2 in der Tunnelmitte nahe des Notausgangs angenommen (kritischste Röhre). In Folge der Freisetzung wird dieser Notausgang vollständig blockiert und steht nicht als Fluchtmöglichkeit zur Verfügung. Auch Personen im Brandnahbereich müssen damit die Fluchtwegdistanz bis zum erreichbaren Tunnelportal zurücklegen.
[6]	Verkehrsaufkommen: Tag / Nacht	Da das Verkehrsaufkommen tageszeitabhängig variiert, befinden sich je nach Tageszeit unterschiedlich viele Personen im Tunnel. Somit wird das jeweilige Ausmaß durch den Zeitpunkt eines Unfalls wesentlich beeinflusst. Bezogen auf 24 h ergibt sich eine Verteilung von 81,25 % mit hohem Verkehrsaufkommen am Tag sowie 18,75 % mit niedrigerem Verkehrsaufkommen in der Nacht.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung																					
[7]	Verkehrszustand: Stau / freier Verkehrsfluss	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Es wird die Annahme getroffen, dass Vollstau während der Tagstunden im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % eintritt.																					
[8]	Detektion erfolgreich: ja / nein	Es wird davon ausgegangen, dass bei einem Brand eine Detektion zu 99 % innerhalb von 15 s nach Brandbeginn erfolgt. Hierdurch wird der starken Temperaturentwicklung infolge der sehr hohen Energiefreisetzungsraten Rechnung getragen.																					
[9]	Alarmierung: ja / nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass eine Alarmierung der Tunnelnutzer über die hierzu vorgesehen betriebstechnischen Ausstattung zeitgleich mit der Detektion zu 99 % erfolgt.																					
[10]	Tunnelspernung: 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 Sperreinrichtung nicht ordnungsgemäß funktioniert und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in 1 % der Fälle eintritt.																					
[11]	Lüftungssystem aktiviert: ja / nein	Beide Bauwerke verfügen über keine mechanische Lüftungsanlage und werden ausschließlich durch eine natürliche Lüftung ventiliert. Es wird davon ausgegangen, dass in 29,76% der Fälle Windstille vorherrscht. Eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,0 m/s ist mit einer Wahrscheinlichkeit von zu 29,69 % auf das tieferliegende Portal und zu 40,55% auf das höherliegende Portal zu erwarten.																					
[12]	Erhöhtes Schadensausmaß: ja / nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes werden, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal 20 zusätzliche Todesopfer zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 zusätzliche Todesopfer (Personen des Busses) zum errechneten Ausmaß addiert.																					
[13]	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. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.																					
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Eintreffzeit nach Freisetzung</th> <th>Eintreffwahrscheinlichkeit</th> <th>Ausmaßminderung</th> </tr> <tr> <th>[min]</th> <th>[%]</th> <th>[%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 5</td> <td>0,0</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>&lt; 10</td> <td>80,0</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>&lt; 15</td> <td>19,0</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>&lt; 20</td> <td>0,9</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>≥ 20</td> <td>0,1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung	[min]	[%]	[%]	< 5	0,0	30	< 10	80,0	20	< 15	19,0	10	< 20	0,9	5	≥ 20	0,1	0
Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung																					
[min]	[%]	[%]																					
< 5	0,0	30																					
< 10	80,0	20																					
< 15	19,0	10																					
< 20	0,9	5																					
≥ 20	0,1	0																					

Tabelle 22: Verzweigungen im Ereignisbaum des Leitstoffes Benzin

#### 7.5.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisablauf infolge einer Propanfreisetzung

Nachfolgende Tabelle 23 enthält eine zusammenfassende Beschreibung der den Ereignisablauf infolge einer Propanfreisetzung beeinflussenden Verzweigungen einschließlich der zugrunde liegenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	Initialereignis	Beim Initialereignis handelt es sich um die Freisetzungshäufigkeit des Leitstoffes Propan in relevanter Menge. Der eingesetzte Wert entstammt den Ausführungen gemäß der Kategorisierung nach ADR 2007. Der Wert des Initialereignisses ist abhängig von der Fahrleistung der Propantransporte im Untersuchungstunnel, einem Korrekturfaktor um die Unfallrate der freien Strecke auf den Tunnel zu übertragen und der relevanten Freisetzungsrates des repräsentativen Leitstoffes Propan.
[2]	Freisetzungsmenge: groß / klein	Es wird angenommen, dass es sich bei 95 % der Freisetzungen nach einem Unfall um eine kleine Freisetzung handelt. Nur in 5 % der Fälle treten große Mengen an Propan aus.
[3]	Freisetzungstyp: spontan / kontinuierlich	Die Freisetzungstypen richten sich nach dem Maß der Beschädigung der den Leitstoff Propan beinhaltenden Behälter. Kommt es zum spontanen Versagen (einem Aufplatzen) tritt die Ladung innerhalb weniger Sekunden aus. Im Falle eines kontinuierlichen Versagens wird nur ein kleiner Bereich beschädigt. Beim damit auftretenden Leck tritt der Leitstoff innerhalb von Minuten bis Stunden aus. Gemäß der Kategorisierung nach ADR 2007 wird für den Leitstoff Propan eine spontane Freisetzung nur in 5 % der Fälle angenommen, eine kontinuierliche dementsprechend zu 95 %.
[4]	Zündung: sofort / verzögert	Zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeiten werden in [PRA 1999] internationale Unfalldaten statistisch ausgewertet. Es ergeben sich daraus folgende Wahrscheinlichkeiten: <u>Spontane Freisetzungen:</u> - Zündung sofort: 65 % - Zündung verzögert: 5 % - keine Zündung: 30 % <u>Kontinuierliche Freisetzungen:</u> - Zündung sofort: 25 % - Zündung verzögert: 5 % - keine Zündung: 70 %
[5]	Ereignisort: Tunnelmitte nahe Notausgang	Der Ereignisort wird in der fallenden Röhre des Bauwerks BW51/2 in der Tunnelmitte nahe des Notausgangs angenommen (kritischste Röhre). In Folge der Freisetzung wird dieser Notausgang vollständig blockiert und steht nicht als Fluchtmöglichkeit zur Verfügung. Auch Personen im Brandnahbereich müssen damit die Fluchtwegdistanz bis zum erreichbaren Tunnelportal zurücklegen.
[6]	Verkehrsaufkommen: Tag / Nacht	Da das Verkehrsaufkommen tageszeitabhängig variiert, befinden sich je nach Tageszeit unterschiedlich viele Personen im Tunnel. Somit wird das jeweilige Ausmaß durch den Zeitpunkt eines Unfalls wesentlich beeinflusst. Bezogen auf 24 h ergibt sich eine Verteilung von 81,25 % mit hohem Verkehrsaufkommen am Tag sowie 18,75 % mit niedrigerem Verkehrsaufkommen in der Nacht.
[7]	Verkehrszustand: Stau / freier Verkehrsfluss	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Es wird die Annahme getroffen, dass Vollstau bei Tag im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % eintritt.
[8]	Detektion erfolgreich: ja / nein	Da bei dem Brand von Propangas sehr hohe Temperaturen entstehen, die über den Temperaturen konventioneller Brände liegen, wird davon ausgegangen, dass eine Detektion zu 99 % innerhalb von 15 s nach Brandbeginn erfolgt.
[9]	Alarmierung: ja / nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass eine Alarmierung der Tunnelnutzer über die betriebstechnischen Einrichtungen zeitgleich mit der Detektion nur zu 99 % erfolgt. Somit erfolgt in 1 % aller Fälle keine Alarmierung.
[10]	Tunnelsperrung: ja / nein	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 1 % der Fälle eintritt.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung		
[11]	Lüftungssystem aktiviert: ja / nein	Beide Bauwerke verfügen über keine mechanische Lüftungsanlage und werden ausschließlich durch eine natürliche Lüftung ventiliert. Es wird davon ausgegangen, dass in 29,76 % der Fälle Windstille vorherrscht. Eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,0 m/s ist mit einer Wahrscheinlichkeit von zu 29,69 % auf das tieferliegende Portal und zu 40,55 % auf das höherliegende Portal zu erwarten.		
[12]	Erhöhtes Schadensausmaß: ja / nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes werden, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal 20 zusätzliche Todesopfer zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 zusätzliche Todesopfer (Personen des Busses) zum errechneten Ausmaß addiert.		
[13]	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. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.		
		Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung
		[min]	[%]	[%]
		< 5	0,0	30
		< 10	80,0	20
		< 15	19,0	10
		< 20	0,9	5
≥ 20	0,1	0		

Tabelle 23: Verzweigungen im Ereignisbaum des Leitstoffes Propan

#### 7.5.4.3

#### Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisablauf infolge einer Chlorfreisetzung

Nachfolgende Tabelle 24 enthält eine zusammenfassende Beschreibung der den Ereignisablauf infolge einer Chlorfreisetzung beeinflussenden Verzweigungen einschließlich der zugrunde liegenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	Initialereignis	Beim Initialereignis handelt es sich um die Freisetzungshäufigkeit des Leitstoffes Chlor in relevanter Menge. Der eingesetzte Wert entstammt den Ausführungen gemäß der Kategorisierung nach ADR 2007. Der Wert des Initialereignisses ist abhängig von der Fahrleistung der Chlortransporte im Untersuchungstunnel, einem Korrekturfaktor um die Unfallrate der freien Strecke auf den Tunnel zu übertragen und der relevanten Freisetzungsrates des repräsentativen Leitstoffes Chlor.
[2]	Freisetzungsmenge: groß / klein	Es wird angenommen, dass es sich bei 95 % der Freisetzungen nach einem Unfall um eine kleine Freisetzung handelt. Nur in 5 % der Fälle treten große Chlormengen aus. Diese Annahme lässt sich damit begründen, dass im betrachteten Gebiet vermutlich nur sehr selten Fahrten mit großen Chlor-Rollcontainern zu verzeichnen sind.
[3]	Freisetzungsort: spontan / kontinuierlich	Die Freisetzungsort richtet sich nach dem Maß der Beschädigung der den Leitstoff Chlor beinhaltenden Behälter. Kommt es zum spontanen Versagen (einem Aufplatzen) tritt die Ladung innerhalb weniger Sekunden aus. Im Falle eines kontinuierlichen Versagens wird nur ein kleiner Bereich beschädigt. Beim damit auftretenden Leck tritt der Leitstoff innerhalb von Minuten bis Stunden aus. Gemäß dem Verfahren zur Kategorisierung nach ADR 2007 wird für den Leitstoff Chlor eine spontane Freisetzung nur in 5 % der Fälle angenommen, eine kontinuierliche dementsprechend zu 95 %.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[4]	Zündung (hier: Wirkung) : sofort / verzögert	Auf Grund der Eigenschaften des repräsentativen Leitstoffes Chlor kann es nicht zu einer verzögerten Wirkung / Aktivierung (Zündung) des Gefahrstoffes kommen. Bei der Freisetzung von Chlor treten unmittelbar die damit einhergehenden Gefährdungen für die Tunnelnutzer auf. Im Gegensatz zu Benzin oder Propan muss hier nicht noch eine Zündung des Leitstoffes erfolgen, um die schädigenden Wirkungen auszulösen. Somit kommt es in 100 % aller Freisetzungsfälle zu einer sofortigen Wirkung des Leitstoffes Chlor.
[5]	Ereignisort: Tunnelmitte nahe Notausgang	Der Ereignisort wird im Fall der Chlorfreisetzung in der steigenden Röhre des Bauwerks BW51/2 in der Tunnelmitte nahe des Notausgangs angenommen (kritischste Röhre). Aufgrund des Schwergasverhaltens wirkt hier die Längsneigung potenziell ausmaßerhöhend. In Folge der Freisetzung wird dieser Notausgang vollständig blockiert und steht nicht als Fluchtmöglichkeit zur Verfügung. Auch Personen im Brandnahbereich müssen damit die Fluchtdistanz bis zum erreichbaren Tunnelportal zurücklegen.
[6]	Verkehrsaufkommen: Tag / Nacht	Da das Verkehrsaufkommen tageszeitabhängig variiert, befinden sich je nach Tageszeit unterschiedlich viele Personen im Tunnel. Somit wird das jeweilige Ausmaß durch den Zeitpunkt eines Unfalls wesentlich beeinflusst. Bezogen auf 24 h ergibt sich eine Verteilung von 81,25 % mit hohem Verkehrsaufkommen am Tag sowie 18,75 % mit niedrigerem Verkehrsaufkommen in der Nacht.
[7]	Verkehrszustand: Stau / freier Verkehrsfluss	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Es wird die Annahme getroffen, dass Vollstau am Tag im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % eintritt.
[8]	Detektion erfolgreich: ja / nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass die Freisetzung des Leitstoffes Chlor in einem von 100 Fällen (1 %) nicht detektiert wird. Die Detektionszeit wird abweichend für die nach [RABT 2016] geforderten maximalen 60 s für eine Branddetektion um 60 s verlängert, da im Tunnel keine technischen Einrichtungen zur Detektion des Leitstoffes Chlor vorhanden sind und davon ausgegangen werden muss, dass eine Alarmierung durch Tunnelnutzer oder Tunnelpersonal erst 120 s nach Freisetzung erfolgt.
[9]	Alarmierung: ja / nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass eine Alarmierung der Tunnelnutzer zeitgleich mit der Detektion nur zu 99 % erfolgt. Somit erfolgt in 1 % aller Fälle keine Alarmierung.
[10]	Tunnelspernung: ja / nein	Technische Probleme können unter Umständen dazu führen, 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 1 % der Fälle eintritt.
[11]	Lüftungssystem aktiviert: ja / nein	Beide Bauwerke verfügen über keine mechanische Lüftungsanlage und werden ausschließlich durch eine natürliche Lüftung ventiliert. Es wird davon ausgegangen, dass in 29,76 % der Fälle Windstille vorherrscht. Eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,0 m/s ist mit einer Wahrscheinlichkeit von zu 29,69 % auf das tieferliegende Portal und zu 40,55 % auf das höherliegende Portal zu erwarten.
[12]	Erhöhtes Schadensausmaß: ja / nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes werden, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal 20 zusätzliche Todesopfer zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 zusätzliche Todesopfer (Personen des Busses) zum errechneten Ausmaß addiert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung		
[13]	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. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.		
		Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung
		[min]	[%]	[%]
		< 5	0,0	30
		< 10	80,0	20
		< 15	19,0	10
		< 20	0,9	5
		≥ 20	0,1	0

Tabelle 24: Verzweigungen im Ereignisbaum des Leitstoffes Chlor

7.5.4.4 Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisablauf infolge einer TNT-Freisetzung

Nachfolgende Tabelle 25 enthält eine zusammenfassende Beschreibung der den Ereignisablauf infolge einer TNT-Freisetzung beeinflussenden Verzweigungen einschließlich der zugrunde liegenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	Initialereignis	Beim Initialereignis handelt es sich um eine Umsetzung des Leitstoffes Trinitrotoluol (TNT) mit nachfolgender Detonation. Der eingesetzte Wert entstammt den Ausführungen gemäß der Kategorisierung nach ADR 2007. Der Wert des Initialereignisses ist abhängig von der Fahrleistung der TNT-Transporte im Untersuchungstunnel, einem Korrekturfaktor um die Unfallrate der freien Strecke auf Tunnel zu übertragen und der relevanten Freisetzungsrate des Leitstoffes TNT.
[2]	Ereignisort	Der Ereignisort wird in der fallenden Röhre des Bauwerks BW51/2 in der Tunnelmitte nahe des Notausgangs angenommen (kritischste Röhre). In Folge der Freisetzung wird dieser Notausgang vollständig blockiert und steht nicht als Fluchtmöglichkeit zur Verfügung. Auch Personen im Nahbereich müssen damit die Fluchtwegdistanz bis zum erreichbaren Tunnelportal zurücklegen.
[3]	Freisetzungsmenge: groß / klein	Es wird angenommen, dass es sich bei 95 % der zur Umsetzung verfügbaren Menge nach einem Unfall um eine kleine Ladung handelt. Nur in 5 % der Fälle sind große Umsetzungsmengen an Trinitrotoluol vorhanden.
[4]	Zündung: sofort / verzögert	Zur Bestimmung der Detonationswahrscheinlichkeiten werden als Grundlage für die Kategorisierung gemäß ADR internationale Unfalldaten statistisch ausgewertet. Es ergeben sich daraus folgende Wahrscheinlichkeiten, die für die Berechnungen verwendet werden: <u>Detonation:</u> - sofort: 10 % - verzögert: 60 % - keine: 30 %
[6]	Verkehrsaufkommen: Tag / Nacht	Da das Verkehrsaufkommen tageszeitabhängig variiert, befinden sich je nach Tageszeit unterschiedlich viele Personen im Tunnel. Somit wird das jeweilige Ausmaß durch den Zeitpunkt eines Unfalls wesentlich beeinflusst. Bezogen auf 24 h ergibt sich eine Verteilung von 81,25 % mit hohem Verkehrsaufkommen am Tag sowie 18,75 % mit niedrigerem Verkehrsaufkommen in der Nacht.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung																					
[7]	Verkehrszustand: Stau / freier Verkehrsfluss	Die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer ist auch vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Es wird die Annahme getroffen, dass Vollstau am Tag im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % eintritt.																					
[8]	Erhöhtes Schadensausmaß Ja / Nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes werden, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal 20 zusätzliche Todesopfer (Businsassen) 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. Bei einer Eintreffzeit von über 20 min ist keine Reduktion mehr zu erwarten.																					
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Eintreffzeit nach Freisetzung</th> <th>Eintreffwahrscheinlichkeit</th> <th>Ausmaßminderung</th> </tr> <tr> <th>[min]</th> <th>[%]</th> <th>[%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 5</td> <td>0,0</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>&lt; 10</td> <td>80,0</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>&lt; 15</td> <td>19,0</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>&lt; 20</td> <td>0,9</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>≥ 20</td> <td>0,1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung	[min]	[%]	[%]	< 5	0,0	30	< 10	80,0	20	< 15	19,0	10	< 20	0,9	5	≥ 20	0,1	0
Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreffwahrscheinlichkeit	Ausmaßminderung																					
[min]	[%]	[%]																					
< 5	0,0	30																					
< 10	80,0	20																					
< 15	19,0	10																					
< 20	0,9	5																					
≥ 20	0,1	0																					

Tabelle 25: Verzweigungen im Ereignisbaum des Leitstoffes TNT

### 7.5.5 Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände 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  $i$

### 7.6 Ermittlung der Schadensausmaße

Bei der Ermittlung von Schadensausmaßen zu den jeweiligen Endzuständen ist grundsätzlich zwischen den Initialereignissen der einzelnen Leitstoffe zu differenzieren. Da die Wirkungen infolge einer Gefahrgutfreisetzung von zahlreichen objektspezifischen Merkmalen abhängig sind, lassen sich die Schadensausmaße für die äußerst seltenen Ereignisse nur mit Hilfe von numerischen Simulationsrechnungen (CFD-Berechnungen) ermitteln.

### 7.6.1 Ermittlung von Einwirkungen (impacts)

Die Ermittlung von Einwirkungen infolge von Bränden, Explosionen 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.

Eingesetzt werden hierfür die CFD-Codes Fire Dynamics Simulator (FDS) und Open-FOAM.

Neben der Abbildung komplizierter Geometrien lassen sich mit diesen Codes auch beliebige Ventilationsbedingungen berücksichtigen. Somit eignen sich diese auch zur Abbildung von Lüftungstechnischen Einrichtungen. Das in FDS 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. Mit OpenFOAM lassen sich kurzzeitdynamische Vorgänge, wie sie im Fall von Detonationen ablaufen, berechnen.

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

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

Das **Preprocessing** umfasst das Modellieren des Tunnelbauwerks mit seinen 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. Die Abbildung von Ventilationsbedingungen erfolgt unter Berücksichtigung meteorologischer und Lüftungssystemspezifischer Rand- und Anfangsbedingungen in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Lüftungskonzeptes.

Nachfolgende Abbildung 19 zeigt die 3D-Modellierung der fallenden Röhre des Tunnels Eisgrub (Tunnel Süd).



Abbildung 19: 3D-Modellierung des Tunnels Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

Die eigentliche Berechnung erfolgt anschließend durch den Processor. Die erforderliche Rechenzeit ist hierbei direkt abhängig von der Größe des Rechengebietes und der gewählten Auflösung. Eine Halbierung der Auflösung 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 einzelner Ausstattungsmerkmale, und wenn erforderlich, von Maßnahmen erzielen. Diese können zur Ableitung von entsprechenden Lüftungskonzepten bzw. deren Verifizierung dienen, die für Brand und Schwergasausbreitungen geeignet sind. Die Darstellung der Rechenergebnisse erfolgt sowohl in 3D- und 2D-Visualisierungen als auch in Diagrammform.

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

### 7.6.1.1 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Benzinfreisetzung

Der Leitstoff Benzin wird mit den in Tabelle 26 definierten Szenarien mit Hilfe von numerischen Berechnungen abgebildet:

Leitstoff	Freisetzungsort	Freigesetzte Menge	Freisetzungsrate	Ausbreitungs- und Wirkungsarten
Benzin	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 20 m <sup>3</sup>	15 t	300 kg/s	- Sofortige Zündung und Lachenbrand
			20,6 kg/s	- Lachenbildung und verzögerte Zündung - Rauchgasausbreitung
	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 10 m <sup>3</sup>	8 t	300 kg/s	- Sofortige Zündung und Lachenbrand
			20,6 kg/s	- Lachenbildung und verzögerte Zündung - Rauchgasausbreitung

Tabelle 26: Untersuchungsszenarien für den Leitstoff Benzin

Bei der Freisetzung von Benzin kommt es ausgehend von der Freisetzungsort zu verschiedenen Brandsituationen. Im Falle der spontanen Freisetzung werden in kurzer Zeit große Mengen im Verkehrsraum freigesetzt (300 kg/s). Aufgrund der Zusammensetzung aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffen gibt es keinen definierten Verdampfungspunkt, sondern eher einen Verdampfungsbereich. Bei den meisten Bestandteilen liegt er so hoch, dass es zu einer Lachenbildung am Austrittsort kommt. Die Lache erreicht auch die Schlitzrinne, durch die ein Teil des auslaufenden Benzins abgeleitet wird.

Im Rahmen der Simulationen entzündet sich die Lache bereits nach kurzer Zeit (z. B. durch Funkenflug oder an überhitzten Fahrzeugteilen). Das entstandene Feuer entwickelt innerhalb kurzer Zeit Brandraten von mehreren 100 MW.

Abbildung 20 zeigt beispielhaft eine Situation unmittelbar nach Brandbeginn.



Abbildung 20: Darstellung einer spontanen Freisetzung von Benzin im Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

In Abbildung 21 ist die Rauchentwicklung im Falle eines Benzinbrandes bei spontaner Freisetzung bei „freiem Verkehr“ dargestellt. Im Brandnahbereich erfolgt der Temperaturanstieg sehr rasch, sodass eine Minute nach Brandausbruch über einen weiten Bereich letale Temperaturen vorherrschen.

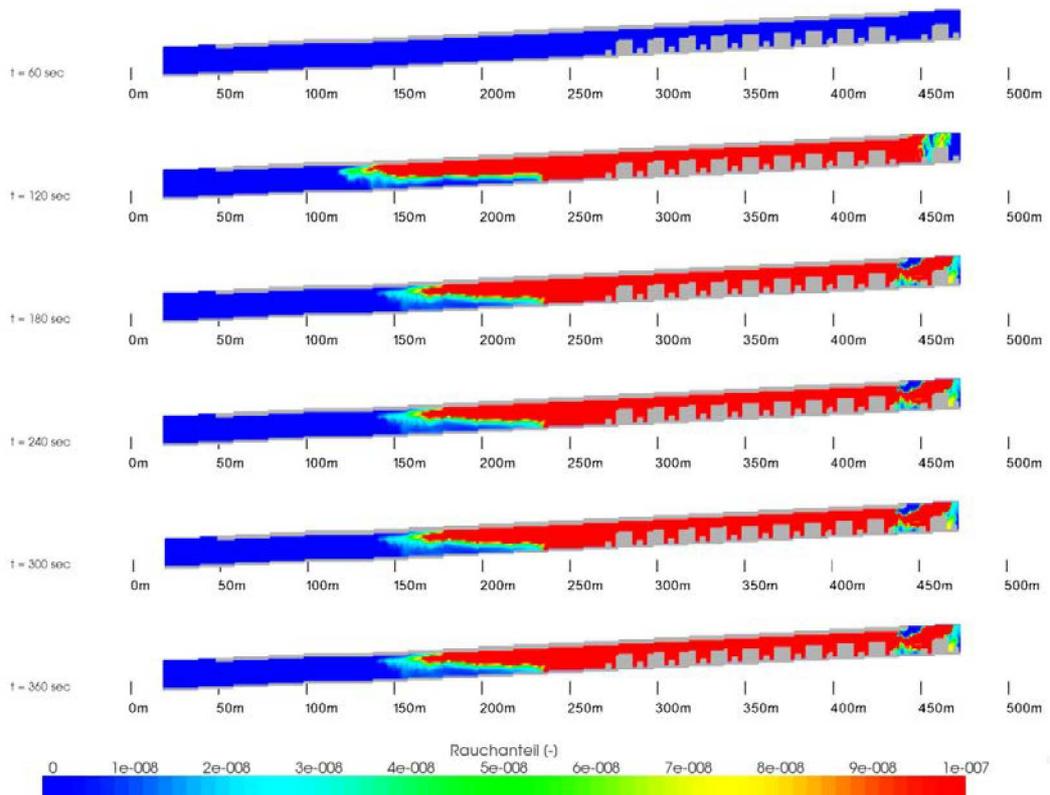


Abbildung 21: Berechnete Rauchausbreitung infolge eines Benzinbrandes bei spontaner Freisetzung bei freiem Verkehr im Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

### 7.6.1.2 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Propanfreisetzung

Für den Leitstoff Propan werden die in nachfolgender Tabelle 27 definierten Szenarien für die Tunnel Eisgrub untersucht.

Leitstoff	Freisetzungsort	Freigesetzte Menge	Freisetzungsrate	Ausbreitungs- und Wirkungsarten
Propan	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung	12 t	400 kg/s	- Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE
			30 kg/s	- Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand
	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung	1 t	400 kg/s	- Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE
			30 kg/s	- Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand

Tabelle 27: Untersuchungsszenarien für den Leitstoff Propan

In der folgenden Abbildung 22 ist ein Simulationsbeispiel zur Flammen- und Rauchausbreitung infolge einer Propanfreisetzung dargestellt. Propan breitet sich aufgrund seines niedrigen Verdampfungspunktes sehr schnell als Gaswolke im Verkehrsraum aus. In hohen Konzentrationen kann es unverbrannt narkotisierend wirken. Bei der Zündung eines Propan-Luft-Gemisches läuft eine sehr schnelle Verbrennung ab, die sich abhängig von der Freisetzungsort zu einem BLEVE- oder Freistrahbrand entwickeln kann.



Abbildung 22: Darstellung einer spontanen Freisetzung von Propan im Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

In Abbildung 23 ist die Temperaturentwicklung im Falle eines Freistrahbrandes bei kontinuierlicher Freisetzung im Vollstau dargestellt. Im Brandnahbereich er-

folgt der Temperaturanstieg sehr rasch, sodass eine Minute nach Brandausbruch in einem Bereich von mehreren 100 m letale Temperaturen vorherrschen.

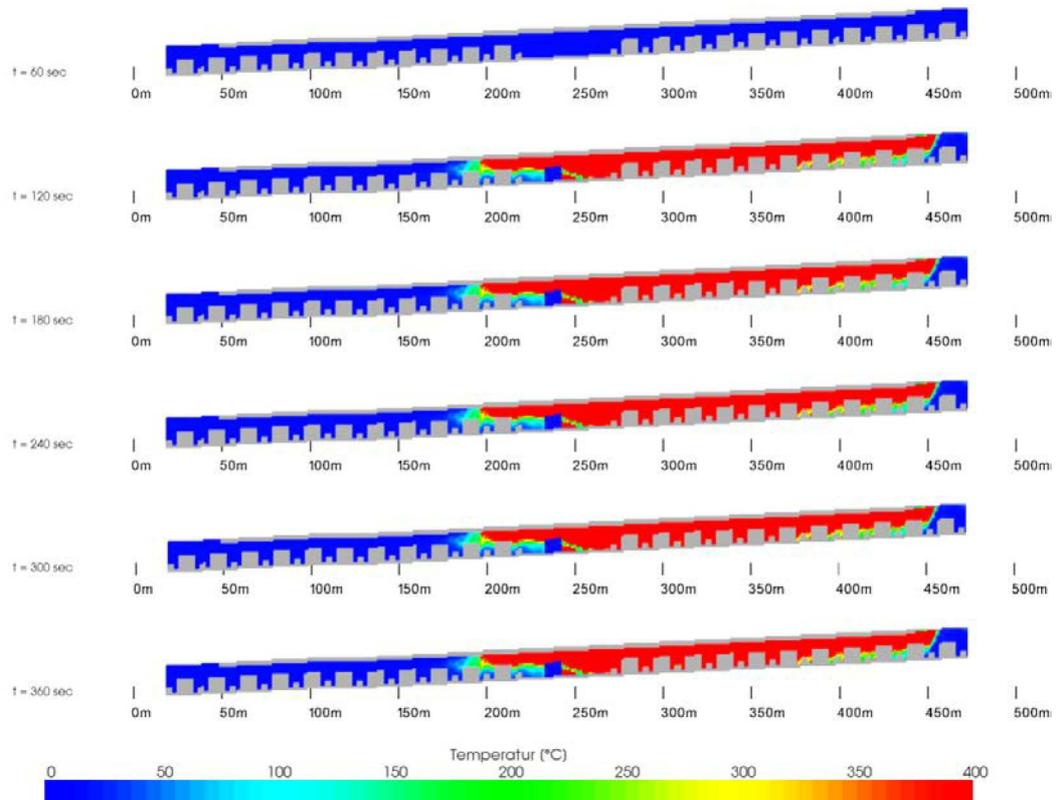


Abbildung 23: Berechnete Temperaturen infolge eines Freistrahlsbrands bei kontinuierlicher Propanfreisetzung (30 kg/s) und Stau im Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

7.6.1.3 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Chlorfreisetzung

Für den Leitstoff Chlor werden die in nachfolgender Tabelle 28 definierten Szenarien für die Tunnel Eisgrub untersucht.

Leitstoff	Freisetzungsart	Freigesetzte Menge	Freisetzungs-rate	Ausbreitungs- und Wirkungsarten
Chlor	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung	4 t	400 kg/s	- Schwergasausbreitung - humantoxische Wirkungen durch Aufnahme über die Atemwege
			45 kg/s	
	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung	0,050 t	400 kg/s	- Schwergasausbreitung - humantoxische Wirkungen durch Aufnahme über die Atemwege
			45 kg/s	

Tabelle 28: Untersuchungsszenarien für den Leitstoff Chlor

Nachfolgende Abbildung 24 zeigt die kontinuierliche Freisetzung von flüssigem Chlor aus einem Leck mit einer Freisetzungsrate von 45 kg/s. Abhängig von der insgesamt verströmten Menge entspricht dies dem Leitstoffszenario 5 bzw. 6. (siehe Abschnitt 7.7.3)

Aufgrund seines größeren Gewichts im Vergleich zu Luft sammelt sich Chlor in Bodennähe an. Die Längsneigung begünstigt in der steigenden Röhre eine Ausbreitung entgegen der Fahrtrichtung sobald die Kolbenwirkung der sich aufstauenden Fahrzeuge nachlässt.

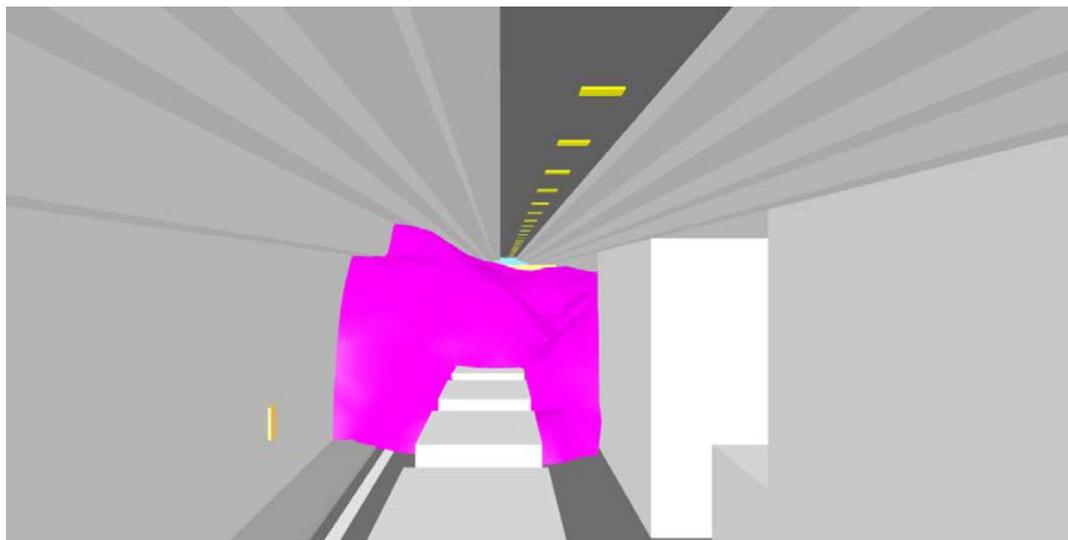


Abbildung 24: Darstellung der kontinuierlichen Freisetzung von Chlor im Tunnel Eisgrub

Da es keine direkte (automatische) Chlorgasdetektion in Tunneln gibt, wird von einer verzögerten Reaktion bei einem Ereignis mit Chlor ausgegangen. Sie erfolgt erst 2 Minuten nach Freisetzungsbeginn. Dies wird auch aus der nachfolgenden Abbildung 25 deutlich, die die spontane Freisetzung von 4.000 kg flüssi-

gem Chlor mit einer Freisetzungsrate von 400 kg/s repräsentiert. Zur Simulationssekunde 60 erfolgt die Freisetzung des Chlors, das sich anschließend im Tunnel ausbreitet.

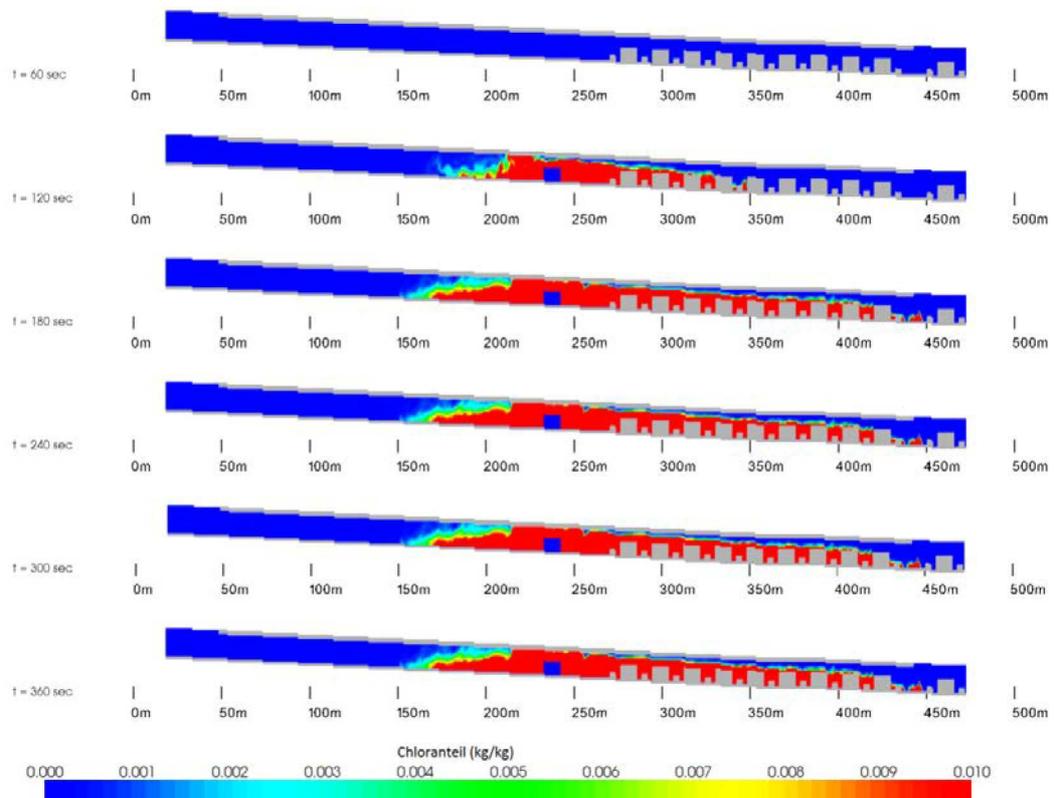


Abbildung 25: Berechnete Konzentrationen infolge einer Chlor-Freisetzung bei freiem Verkehr

#### 7.6.1.4 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer TNT-Freisetzung

Für den Leitstoff TNT werden die in nachfolgender Tabelle 29 definierten Szenarien für die Tunnel Eisgrub untersucht.

Leitstoff	Freisetzungsort	Freigesetzte Menge	Ausbreitungs- und Wirkungsarten
TNT	Transport von 1.000 kg TNT-Äquivalent.: Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, wodurch eine Explosion ausgelöst wird.	1 t	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)
	Transport von 100 kg TNT-Äquivalent: Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, wodurch eine Explosion ausgelöst wird.	100 kg	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)

Tabelle 29: Untersuchungsszenarien für den Leitstoff TNT

Bei der Detonation (Blast) von explosionsgefährlichen Stoffen kommt es in der Nähe der Ladung zu einem sehr schnellen und hohen Druckanstieg (siehe Abbildung 26). Dadurch wird eine Schockwelle ausgelöst, die sich zunächst mit Überschallgeschwindigkeit ausbreitet. In weiterer Entfernung zur Ladung geht die Schockwelle in eine gewöhnliche Stoßwelle über, die sich dann mit Schallge-

schwindigkeit ausbreitet. Die Zerstörungswirkung einer Explosion ergibt sich aus der Stärke der Druckwelle, d. h. der Höhe der Druckamplitude (Explosionsspitzenüberdruck) und der Zeitdauer der Druckwirkung (Dauer der sog. positiven Druckphase). Im Gegensatz zum Leitstoff Propan ist bei einer Detonation die entstehende Hitzewirkung jedoch vernachlässigbar, da die Druckwirkung deutlich überwiegt und somit für das zu erwartende Schadensausmaß maßgebend ist. In Tunneln kann es zu Verdämmungseffekten kommen, wodurch sich die Wirkung weiter verstärkt.

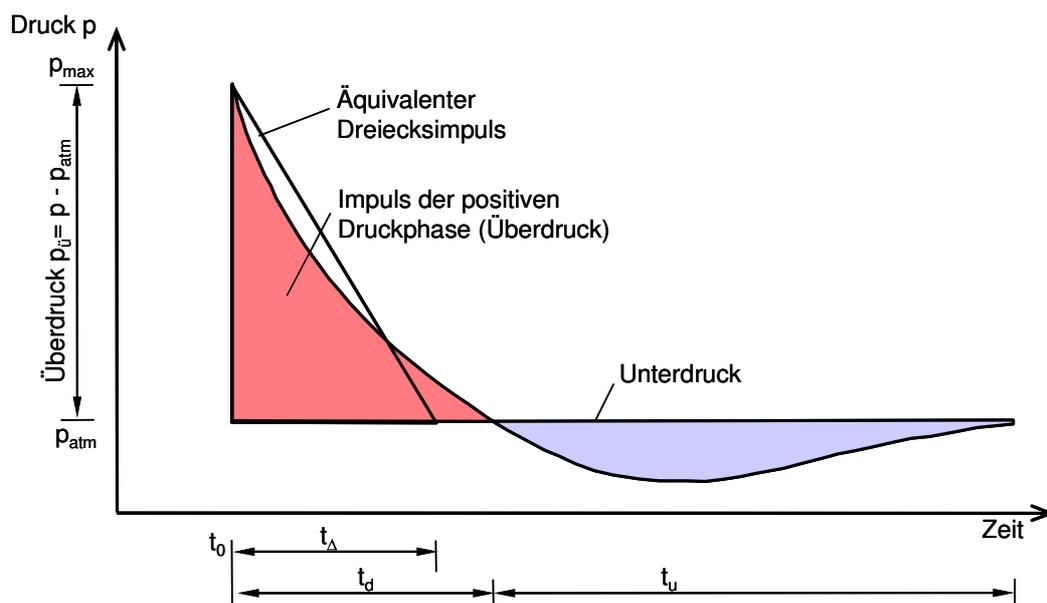


Abbildung 26: Druckanstieg bei Detonation

In Abbildung 27 und Abbildung 28 ist eine Visualisierung der numerischen Berechnungen zur Druckausbreitung infolge einer Detonation von 1 t TNT zu unterschiedlichen Zeitpunkten beispielhaft abgebildet. Die Druckwelle breitet sich hierbei innerhalb weniger Millisekunden über den gesamten Tunnelquerschnitt aus.

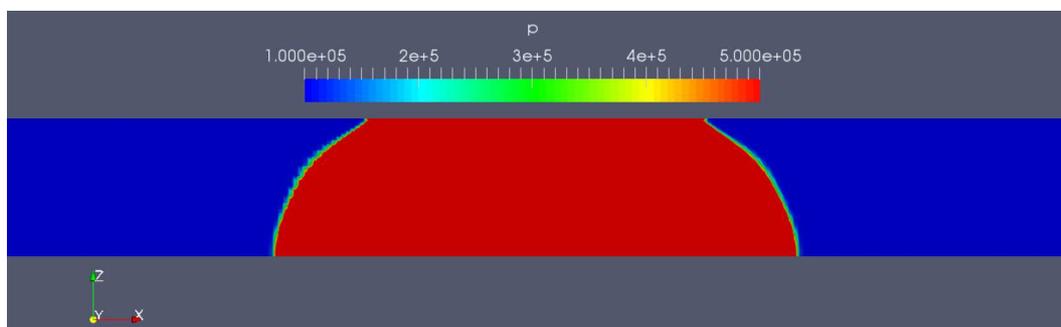


Abbildung 27: Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 1 t TNT nach ca. 3 ms

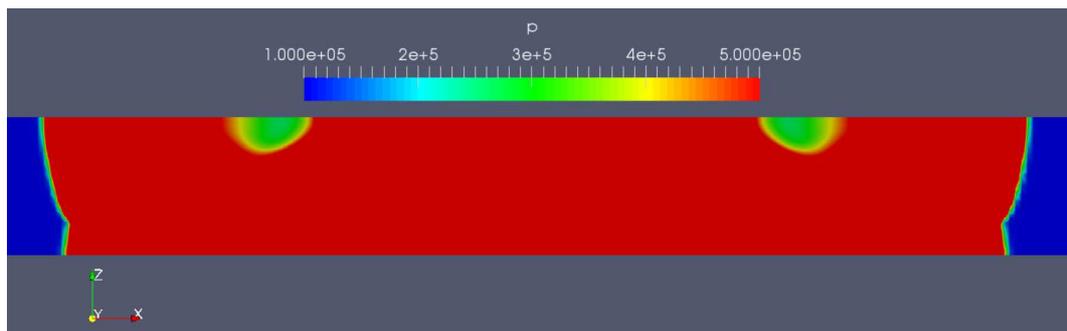


Abbildung 28: Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 1 t TNT nach ca. 10 ms

## 7.6.2 Ermittlung von Auswirkungen (consequences)

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

Die Bestimmung von personenbezogenen Schadensausmaßen erfolgt hierbei mittels Selbstrettungsbereiche 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.

### 7.6.2.1 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Benzinfreisetzung

Auf ihrer Flucht werden Tunnelnutzer im Wesentlichen durch den Einfluss von Rauch behindert, bestehend aus den Rußpartikeln und Rauchgasen. 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 [ASR 2006].

Untersuchungen haben ergeben, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt von der vorhandenen Sichtweite abhängig ist. Wie aus Abbildung 29 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i. d. R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden, bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.

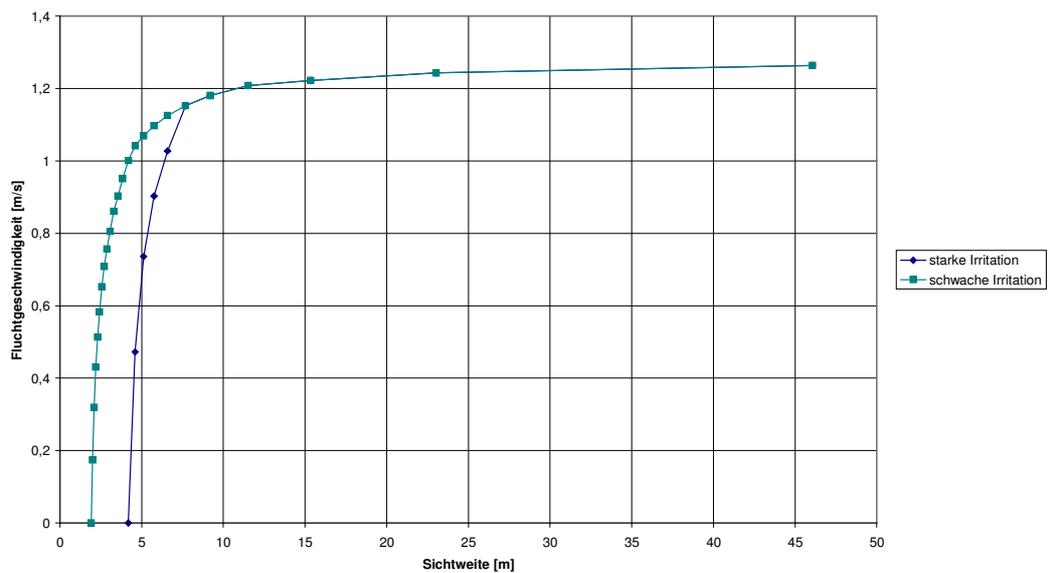


Abbildung 29: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte [ASR 2006]

Durch Überlagerung dieses Zusammenhanges mit den numerisch berechneten Sichtweiten lassen sich in Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit und den Fluchtwegdistanzen Selbstrettungsbereiche ableiten.

Abbildung 30 zeigt die Selbstrettungsbereiche der fallenden Röhre im Tunnel Erdgrub Süd. Über die Verknüpfung der Selbstrettungsbereiche mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich dann für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenzahlen bestimmen.

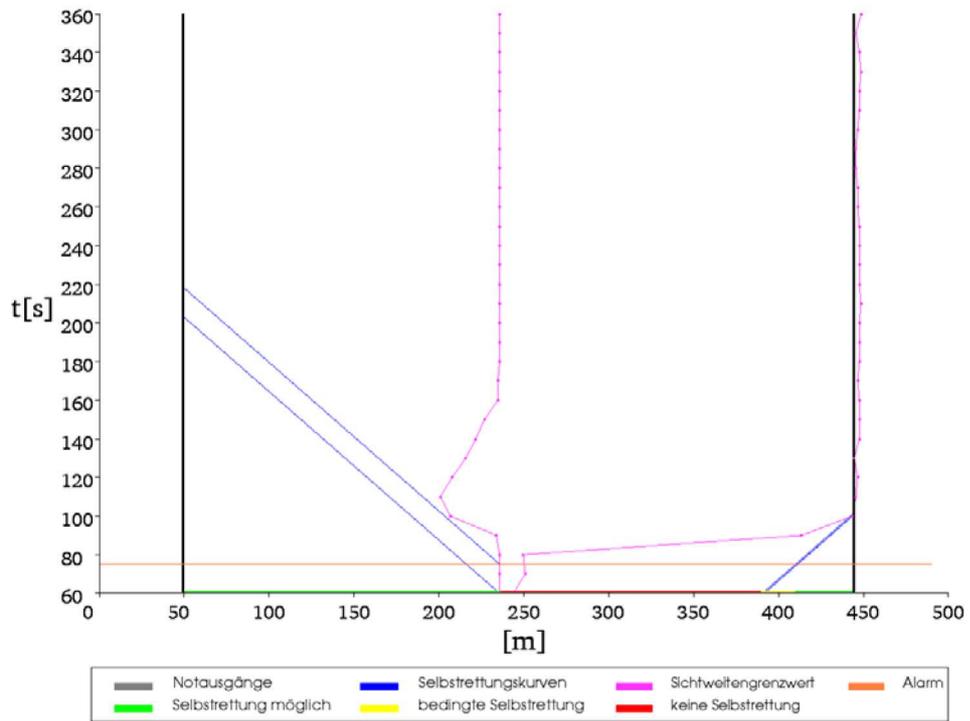


Abbildung 30: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Tunnel Eisgrub bei kontinuierlicher Freisetzung von Benzin (Tunnel Süd, kritische Röhre)

### 7.6.2.2 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Propanfreisetzung

Im Fall einer Propanfreisetzung dominieren aufgrund der Flammenausbreitung die Effekte infolge Temperatureinwirkung. Die dabei freigesetzte Energie kann auf den Menschen sowohl durch Wärmestrahlung als auch durch konvektive Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelbaren Flammenbereich, während durch konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche transportiert werden kann. Die Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Verbrennungen oder Wärmestaubildung im menschlichen Organismus führen. Im Allgemeinen führen kurze Expositionszeiten aufgrund der körpereigenen Wärmekapazität zu keiner signifikanten Erhöhung der Körpertemperatur. Jedoch können bereits kurze Expositionszeiten zu Verbrennungen auf der Haut und im Atemtrakt führen. Zur Ermittlung der Schadensausmaße wird der in nachfolgender Abbildung 31 dargestellte Zusammenhang zwischen Temperatur und Einwirkzeit nach Purser verwendet.

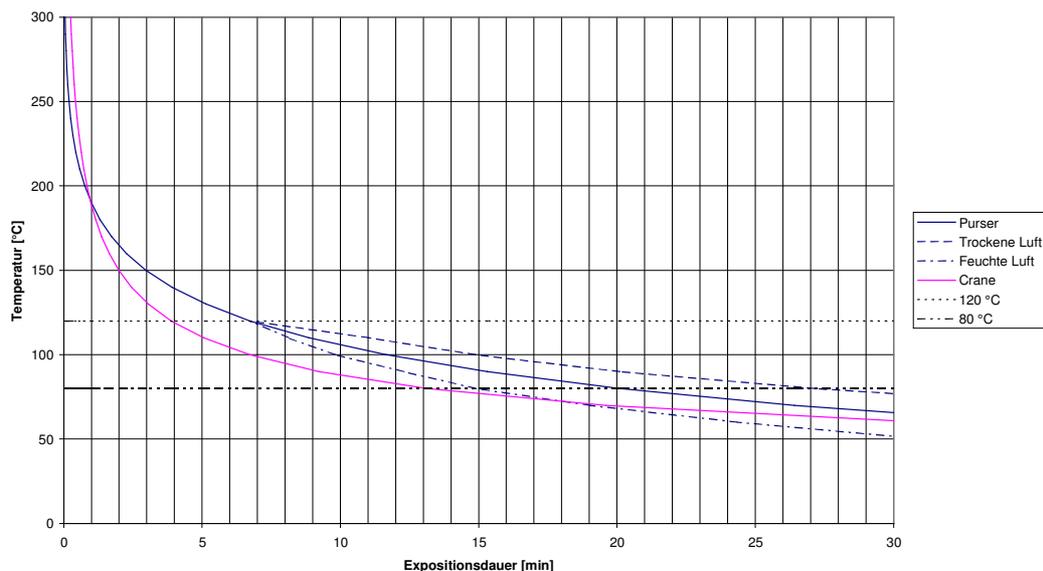


Abbildung 31: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung [ASR 2006]

Auf Basis dieses Zusammenhangs werden mit Hilfe der numerischen Berechnungen zur Temperaturverteilung die Selbstrettungsbereiche in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit, dem Notausgangsabstand und der Detektionszeit bestimmt.

Über die anschließende Verknüpfung der Selbstrettungsbereiche mit den verkehrszustandsabhängigen Personendichten werden dann bereichsbezogen die jeweiligen Betroffenenzahlen ermittelt (siehe Abbildung 32).

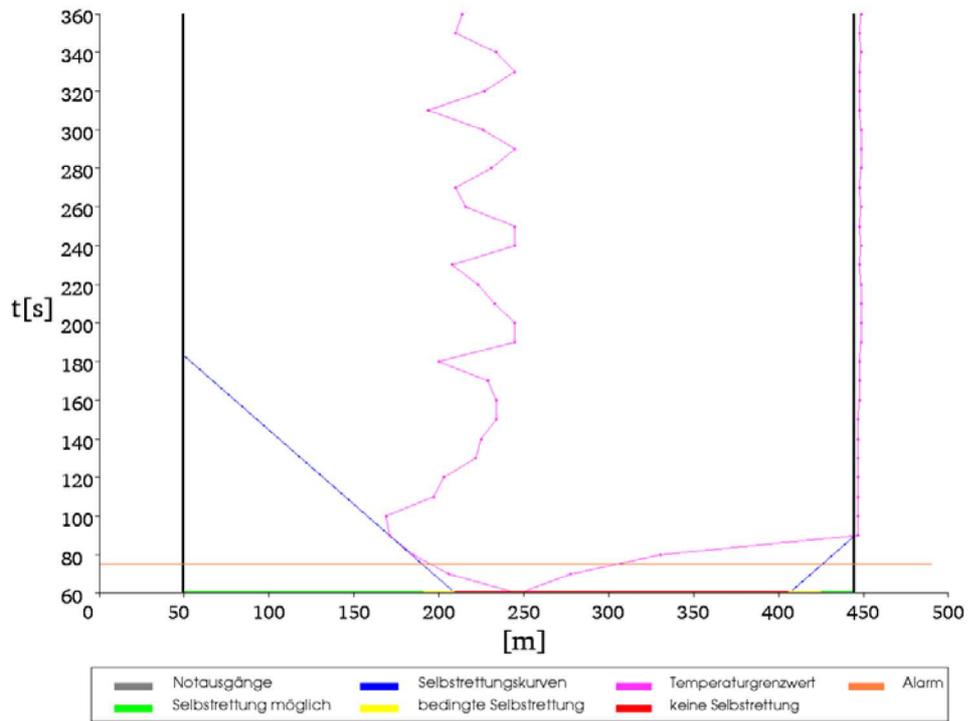


Abbildung 32: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen infolge eines Freistrahbrandes in den Tunnel Eisgrub (Tunnel Süd, kritische Röhre)

### 7.6.2.3 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Chlorfreisetzung

Chlor weist aufgrund seiner Dichte ( $3,214 \text{ kg/m}^3$ ) bei der Ausbreitung ein ausgeprägtes Schwergasverhalten auf. Bei der Inhalation von Chlor kommt es zu starker Irritationen der Atemwege, Augen und Haut, da sich in Verbindung mit Feuchte hypochlorige Säure und Salzsäure bilden, die das Gewebe angreifen. Chlorkonzentrationen von ca. 0,5 % in der Atemluft sind für den Menschen tödlich.

Zur Ermittlung der Wirkungen durch Chlorexposition wird die Probitfunktion gemäß den Vorgaben der Tunnelkategorisierung gemäß ADR 2007 verwendet. In nachfolgender Abbildung 33 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt.

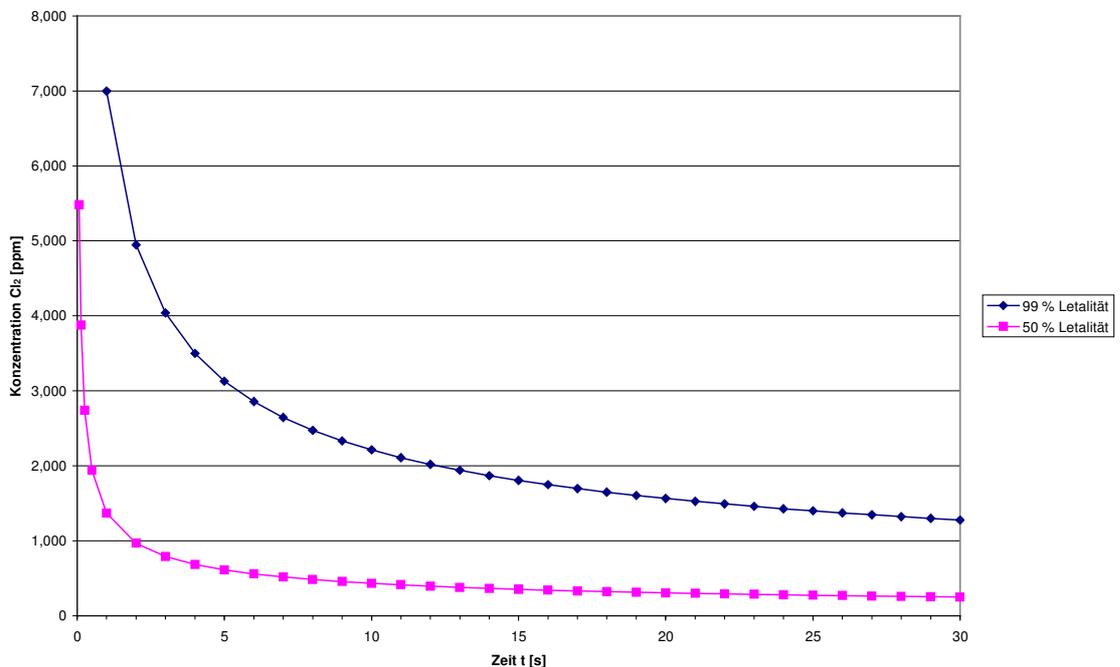


Abbildung 33: Letalitäten infolge Chlorexposition

Durch Überlagerung dieses zeitabhängigen Zusammenhanges mit den numerisch berechneten Chlorkonzentrationen können in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit, dem Notausgangsabstand und der Alarmierung Selbstrettungsbereiche bestimmt werden. In Abbildung 34 sind die entsprechenden Selbstrettungsbereiche dargestellt. Die Bestimmung der Betroffenenzahlen erfolgt schließlich über die Verknüpfung der berechneten Personendichten mit den Selbstrettungsbereichen.

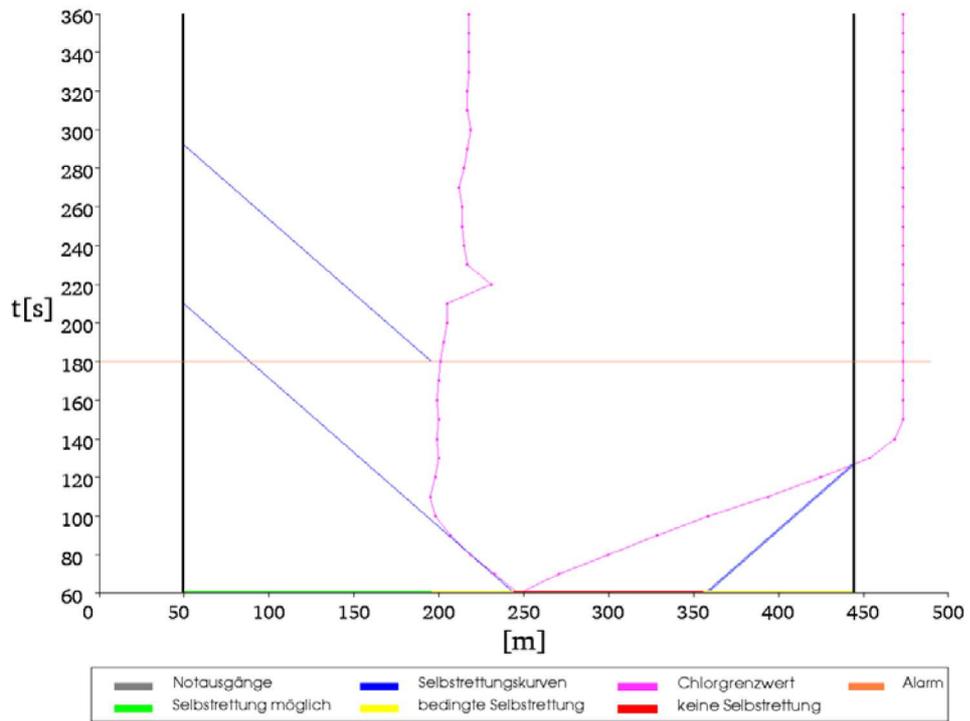


Abbildung 34: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen infolge einer Chlorfreisetzung bei freiem Verkehr

#### 7.6.2.4 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer TNT-Freisetzung

Die infolge einer Detonation entstehende Druckwelle führt bereits ab einem Überdruck von 40 kPa zu schwerwiegenden Personenschäden. Ab einem Überdruck von ca. 180 kPa ist mit einer Letalität von 1 % und ab einem Überdruck von 350 kPa mit einer Letalität von 99 % der exponierten Personen zu rechnen. Den Zusammenhang zwischen Personenschäden und Überdruck zeigt nachfolgende Abbildung 35.

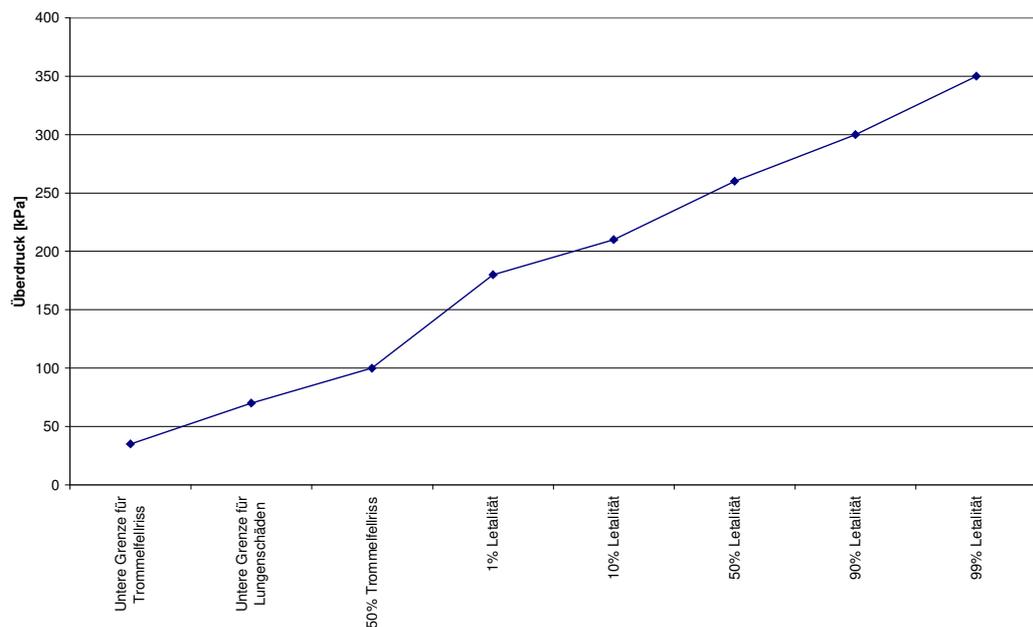


Abbildung 35: Personenschäden infolge Überdrucks

Ausgehend vom simulierten Verlauf des Drucks werden anhand dieses Zusammenhangs die Personenschäden im Tunnel infolge einer TNT-Umsetzung ermittelt. Die infolge von Druckeinwirkungen im Tunnel Eisgrub zu erwartenden Letalitätsbereiche zeigt Abbildung 36 für eine 100 kg TNT Umsetzung und Abbildung 37 für eine 1.000 kg TNT Umsetzung. Durch Überlagerung dieser Letalitätsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen.

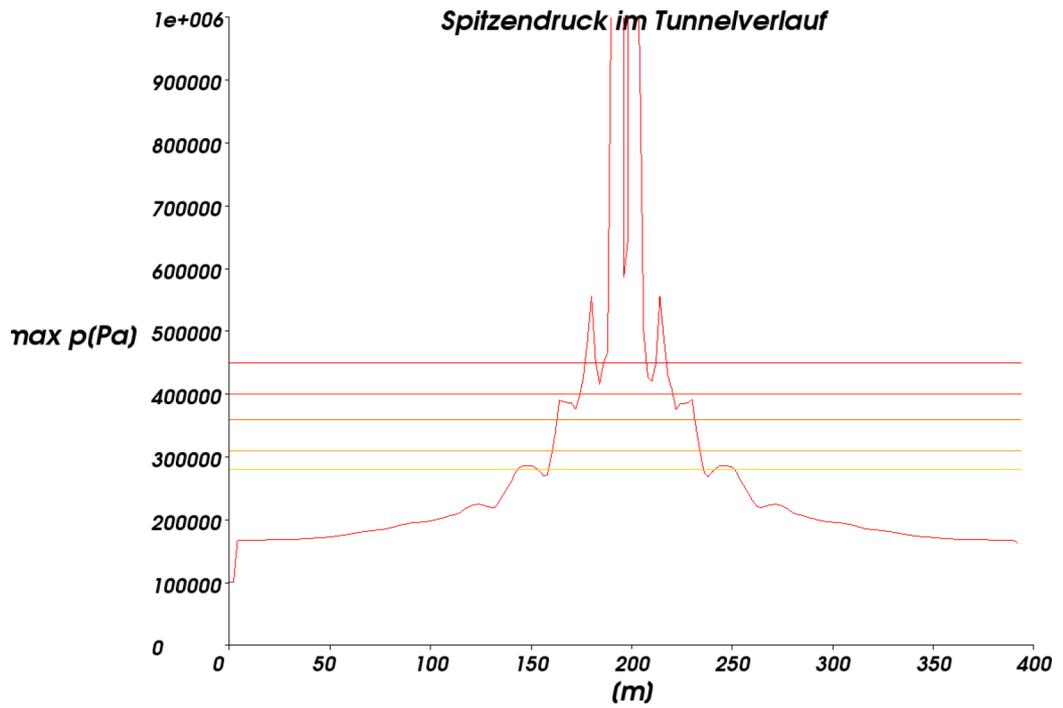


Abbildung 36: Entfernungsabhängiger Druckverlauf im Tunnel Eisgrub für eine 100 kg TNT Umsetzung

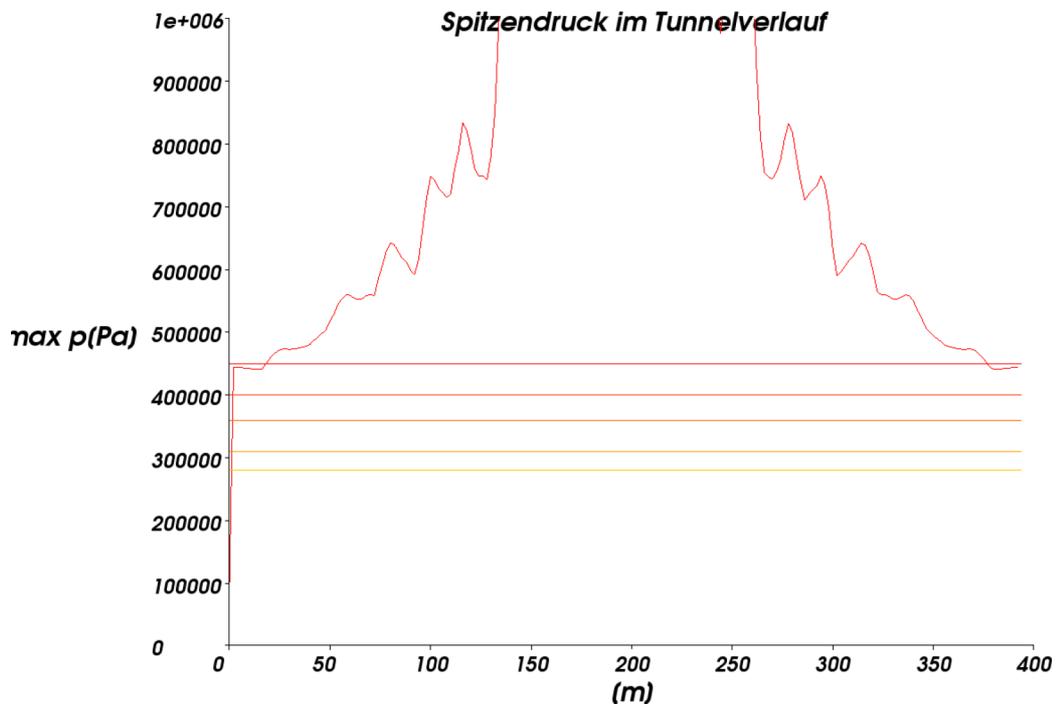


Abbildung 37: Entfernungsabhängiger Druckverlauf im Tunnel Eisgrub für eine 1.000 kg TNT Umsetzung

## 7.7 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 (Schadens erwartungswert) als auch in Form von HA-Diagrammen für jedes Untersuchungsszenario ausgewiesen. Der Schadens erwartungswert 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

### 7.7.1 Risiken infolge einer Benzinfreisetzung

In der Abbildung 38 sind für den Leitstoff Benzin die Summenkurven für die fallende Röhre des 395 m langen Tunnels Eisgrub (Bauwerk 51/2, Tunnel Süd) dargestellt. Die Kurven werden auf der Grundlage der durchgeführten Simulationen für einen Freisetzungsort in Tunnelmitte erstellt.

Hohe Personenopferzahlen in Ereignissen mit Benzinfreisetzung resultieren unter anderem daraus, dass hier die Brände eine hohe Brandleistung mit einem schnellen zeitlichen Ablauf haben. Somit erreichen in vielen Fällen die flüchtenden Personen nicht mehr die sicheren Bereiche. Da der einzige Notausgang in Tunnelmitte nicht zur Verfügung steht, muss über die Portale geflüchtet werden.

Besonders in Szenarien mit Vollstau ist mit hohen Betroffenenzahlen zu rechnen. Als Bemessungsbrandleistung sind in den [RABT 2016] bis zu 100 MW vorgesehen. Die Brandleistungen erreichen jedoch ausgehend von den durchgeführten Simulationen ein Vielfaches dieses Wertes.

Zusätzlich vollzieht sich die Brandentwicklung sehr rasch und erreicht ihre maximale Stärke bereits innerhalb kürzester Zeit nach dem Beginn der Freisetzung. Die Freisetzung von 15.000 kg Benzin bei einer spontanen Freisetzungsrate von 300 kg/s dauert insgesamt nur ca. 50 s, sodass sich die komplette Ladung selbst bei schneller Detektion im Tunnel über größere Bereiche verteilt hat.

Nicht in Betracht gezogen werden hierbei Effekte infolge von Sekundärbränden. Aufgrund der großen Hitzeentwicklungen ist davon auszugehen, dass Feuer auch auf weitere Fahrzeuge im Tunnel überspringen kann, so dass es zu einer deutlich verlängerten Gesamtbranddauer kommen dürfte. Für die Ermittlung der Personenschäden sind die Sekundärbrände jedoch von untergeordneter Bedeu-

tung und können vernachlässigt werden. Aus den ermittelten Diagrammen der Selbstrettungsbereiche ist ersichtlich, dass für die Ausmaße die ersten Minuten relevant sind, in denen Sekundärbrände noch keinen Einfluss haben.

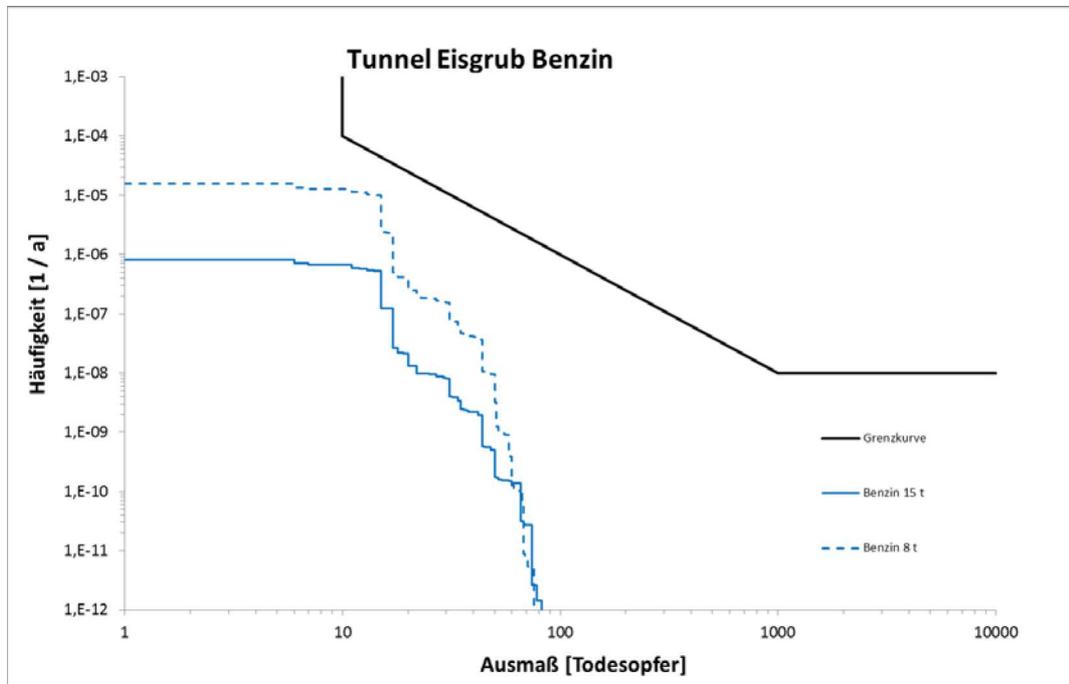


Abbildung 38: HA-Diagramm für den Leitstoff Benzin (nicht normiertes Risiko)

### 7.7.2 Risiken infolge einer Propanfreisetzung

Für den Leitstoff Propan sind in der nachfolgenden Abbildung 39 die ermittelten Summenkurven jeweils für die fallende Röhre des Untersuchungstunnels dargestellt.

Sowohl in Szenarien mit 1 t als auch in Szenarien mit 12 t freigesetztem Propan ergeben die Simulationen im Stauffall Opferzahlen von deutlich über 100 Personen. Tunnelnutzer in brandnahen Bereichen haben aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten ohne Vorwarnung keine Möglichkeit, sich rechtzeitig in Sicherheit zu begeben.

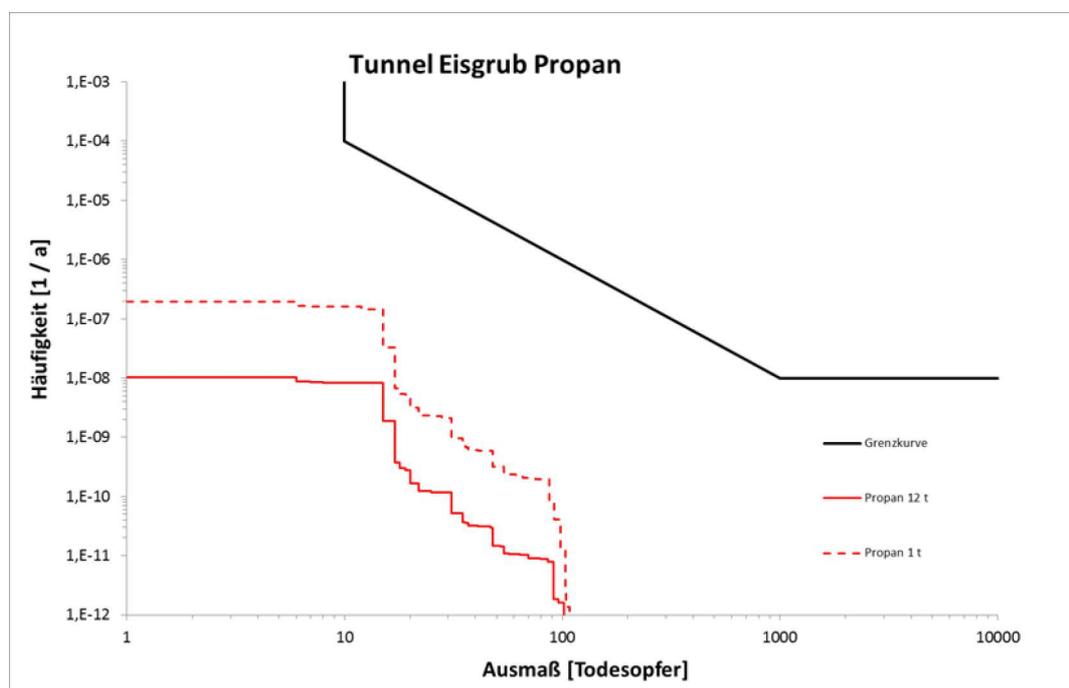


Abbildung 39: HA-Diagramm für den Leitstoff Propan (nicht normiertes Risiko)

### 7.7.3 Risiken infolge einer Chlorfreisetzung

Für den Leitstoff Chlor sind in der nachfolgenden Abbildung 40 die ermittelten Summenkurven jeweils für die in Fahrtrichtung fallende Röhre des Untersuchungstunnels zusammenfassen dargestellt. Aufgrund der festgelegten Freisetzungsverteilung von 5 % im Falle der großen Freisetzung von 4.000 kg im Vergleich zu 95 % für die Freisetzung von 50 kg liegt die Wahrscheinlichkeit für die kleine Freisetzung deutlich höher.

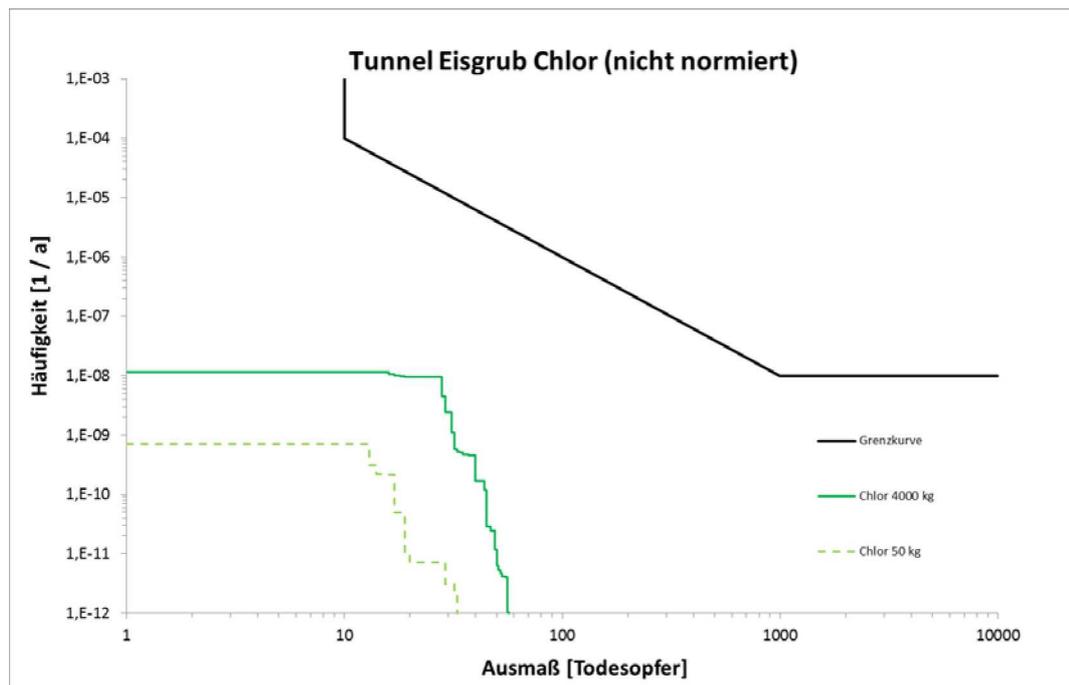


Abbildung 40: HA-Diagramm für den Leitstoff Chlor (nicht normiertes Risiko)

### 7.7.4 Risiken infolge einer TNT-Freisetzung

In Abbildung 41 sind für den Leitstoff TNT die Summenkurven für die fallende Röhre des Untersuchungstunnels für einen Freisetzungsort in Tunnelmitte dargestellt.

Insgesamt weisen die Summenkurven vom Initialereignis ausgehend zunächst einen sehr flachen Verlauf auf, d. h. das Schadensausmaß nimmt im Fall eines Ereignisses sehr schnell zu. Dies spiegelt wider, dass das Schadensausmaß von den sich im Tunnel befindlichen Personen bestimmt wird. Aufgrund der hohen Freisetzungsgeschwindigkeit, welche Überschallgeschwindigkeit erreichen kann, ist eine Selbstrettung überhaupt nur dann möglich, wenn eine rechtzeitige Warnung erfolgt, also nur im Falle einer verzögerten Freisetzung bzw. Zündung. Für die kleine Freisetzungsmenge von 100 kg TNT gilt, dass sich der Druck relativ schnell abbaut, so dass deutlich weniger Personen betroffen sind als bei den hohen Freisetzungsraten von 1 t.

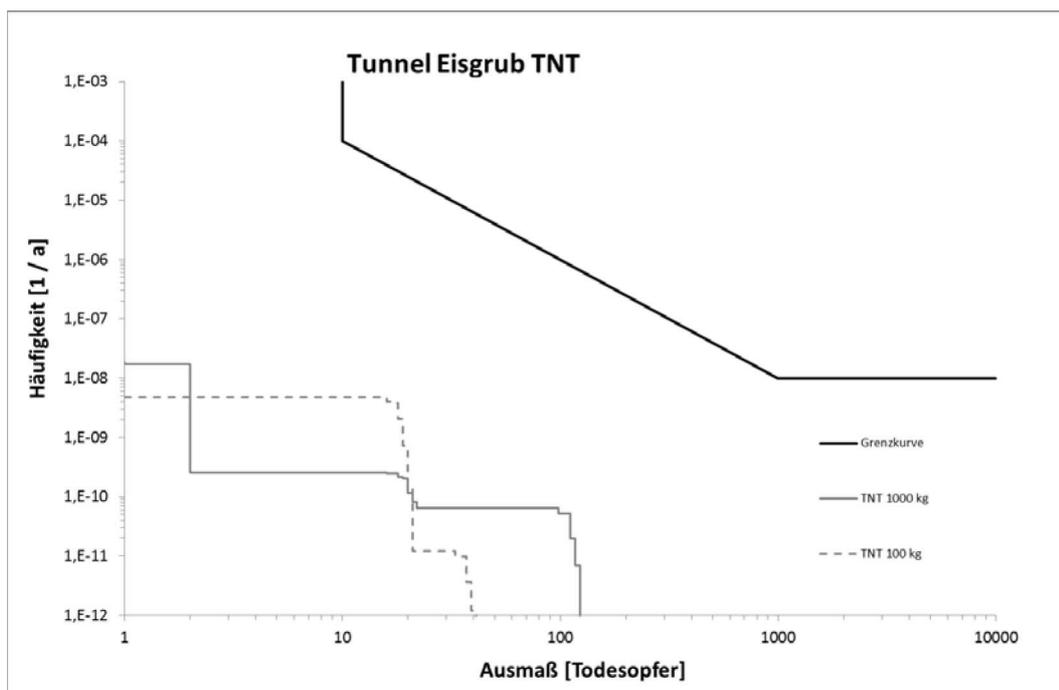


Abbildung 41: HA-Diagramm für den Leitstoff TNT (nicht normiertes. Risiko)

## 7.8 Risikobewertung und Kategorisierung gemäß ADR

Zur Bewertung der Risiken wurde im Verfahren zur Kategorisierung von Tunneln als Bewertungsmaßstab eine Vergleichsgerade definiert (siehe Abbildung 42). Wird diese von der Gesamtsummenhäufigkeitslinie einer Kategorie überschritten, so ist der Tunnel für den Transport von Gefahrgütern dieser Kategorie zu beschränken.

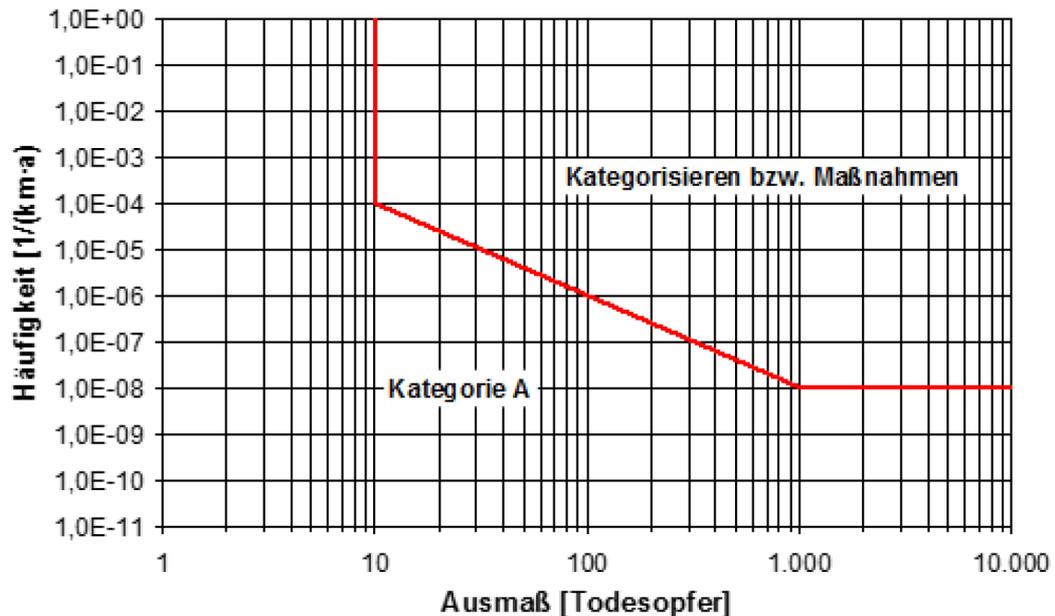


Abbildung 42: Vergleichskurve

Im Falle einer Beschränkung ist in der Verfahrensstufe 2b dann ggf. zu überprüfen, inwiefern die vorgesehene Umfahrungsstrecke die dann zu erwartenden Gefahrguttransporte hinsichtlich des Risikos aufnehmen kann. Alternativ kommt im Rahmen einer weiteren Untersuchung die Berücksichtigung von weiteren sicherheitserhöhenden Maßnahmen in Betracht, um das Risiko im Tunnel zu senken.

In der nachfolgenden Abbildung 43 sind die für die Tunnel Eisgrub ermittelten Summenhäufigkeitskurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT einander gegenübergestellt. Die 395 m langen Röhren des Tunnels Eisgrub (Bauwerk 51/2, Tunnel Süd) stehen als maßgeblicher Untersuchungstunnel auch stellvertretend für die Tunnelröhren des 255 m Bauwerks BW51/1 (Tunnel Nord). Die Kurven wurden auf der Grundlage der durchgeführten Simulationen erstellt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Vereinheitlichung werden die Kurven nun nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR auf 1 km Tunnellänge normiert. Für diese normierten Kurven ist dem Verfahren eine Grenzkurve gegeben, anhand der die Kategorisierung vorgenommen wird.

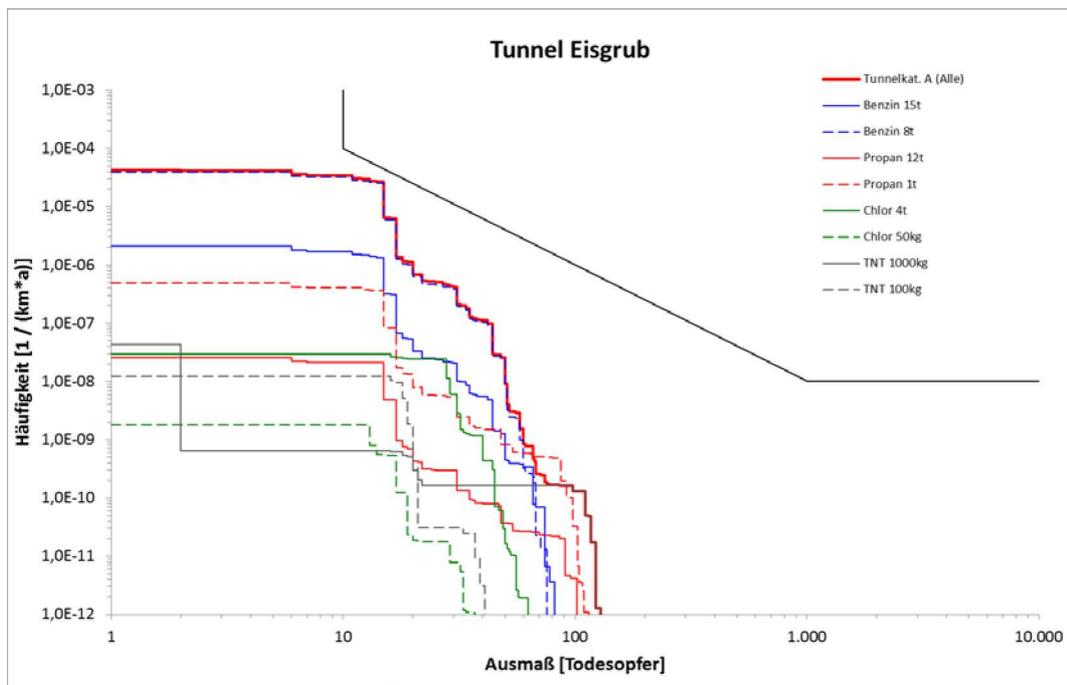


Abbildung 43: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Tunnel Eisgrub

Gefahrgutfreisetzung sind häufig durch sehr große Schadensausmaße geprägt, da in jedem Szenario Personen betroffen sind, die sich unabhängig von der Verkehrssituation (freier Verkehr oder Vollstau) im Gefährdungsbereich der Leitstoffe befinden.

Die höchsten Ausmaßwerte ergeben sich in Szenarien mit Vollstau. Bei den Benzinfreisetzungen sind bis zu 102 Personen betroffen, bei TNT bis zu 143 Personen, weil über fast die gesamte Tunnelstrecke kritische Druckverhältnisse vorhanden sind. In diesen Szenarien hat die Fahrzeugdichte im Tunnel starken Einfluss auf das Gesamtausmaß.

Durch die Annahme des Freisetzungsortes in Tunnelmitte ist der zusätzliche Notausgang für Tunnelnutzer nicht verfügbar. Dies stellt den ungünstigsten Fall im Hinblick auf die Risikobewertung dar, da sich die Tunnelnutzer nun über die Portale in sichere Bereiche flüchten können.

Wie aus Abbildung 43 ersichtlich, liegt die Summenkurve aller Leitstoffe unterhalb der im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007 festgelegten Grenzkurve. Damit ergeben sich für den Tunnel Eisgrub keine Einschränkungen hinsichtlich der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten. Für den Tunnel kann somit die Kategorie A vergeben werden. Eine weitere Eingrenzung in weitere Tunnelkategorien ist damit nicht erforderlich.

## 7.9 Zusatzbetrachtung Tunnelverlängerung

Die Tunnelröhre Süd ist derzeit mit einer Länge von 395 m geplant. Die Auswirkungen einer möglichen Tunnelverlängerung auf 500 m und gleichzeitig steigenden Verkehrsbelastung sind nachfolgend im Rahmen einer Voruntersuchung dargestellt. Dazu wurde nur der Leitstoff Benzin betrachtet, weil er für die Tunnel Eisgrub maßgeblich für die Kategorisierung ist. Die Tunnelausstattung, wie die Anordnung eines Notausgangs in Tunnelmitte und der Installation einer automatischen Brandmeldeanlage, entspricht hierbei der gleichen wie bei der Untersuchung des 395 m langen Tunnels. Eine mechanische Ventilation ist gemäß den RABT weiterhin nicht erforderlich. Nachfolgende Abbildung 44 zeigt vergleichend die Benzinkurve für den Tunnel Süd mit 395 m und einem DTV von 19.300 Kfz/24h und einem verlängerten Tunnel von 500 m und einem DTV von 30.000 Kfz/24h.

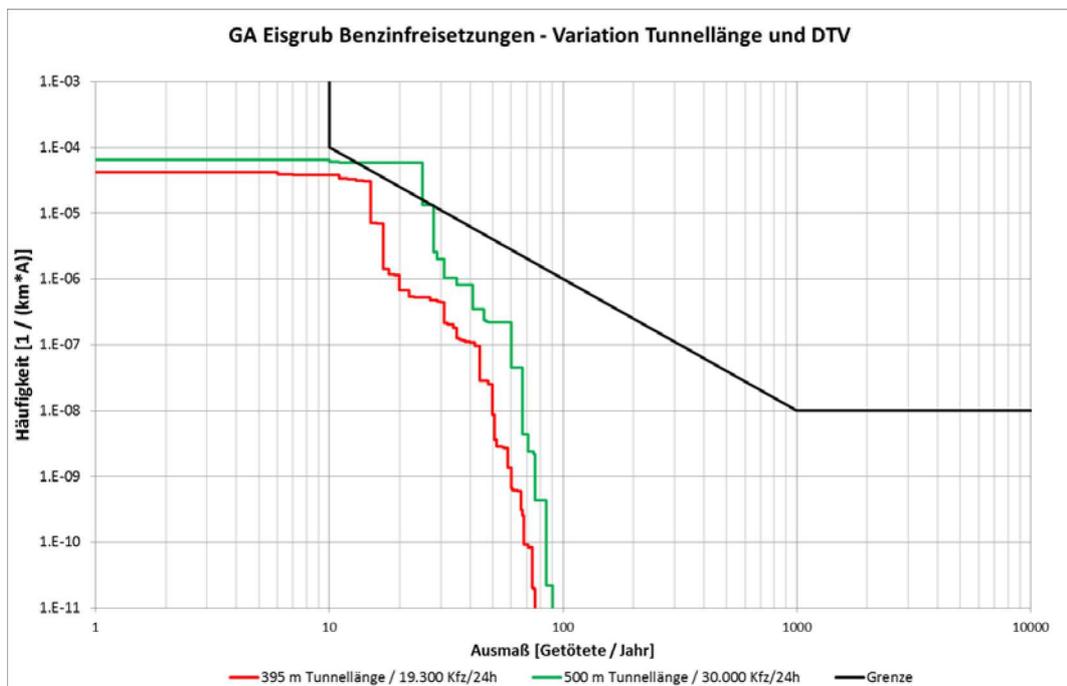


Abbildung 44: Auswirkungen Tunnellänge / Verkehrsbelastung

Bereits die Benzinfreisetzen führen unter dieser Konstellation zu Überschreitung der Grenzkurve so dass eine Kategorisierung erforderlich wäre, falls keine zusätzlichen sicherheitserhöhenden Maßnahmen getroffen werden.

Zusätzliche sicherheitserhöhende Maßnahmen können beispielsweise die Anordnung mindestens eines weiteren Notausgangs zur Verkürzung der Fluchtwege und in Kombination dazu eine verkürzte Ereignisdetektion darstellen.

Auch bei der Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kann von einer positiven Beeinflussung des Risikos ausgegangen werden. In Anlehnung an das Verfahren zur ADR-Kategorisierung von Straßentunneln [FE ADR 2009] kann

davon ausgegangen werden, dass sich die Unfallrate proportional zur Geschwindigkeit verhält. Eine Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h auf 60 km/h kann somit zu einer Reduktion der Eintrittshäufigkeit von Ereignissen von 25 % führen.

Ebenso kann das Risiko durch zeitliche Eingrenzung der Befahrbarkeit für Gefahrguttransporte (Nachtfahrten ggf. mit Begleitfahrzeugen) positiv beeinflusst werden. Durch die Verlagerung der Gefahrguttransporte auf die Nachtstunden mit geringerer Verkehrsbelastung sind im Ereignisfall weniger Menschen Gefährdungen ausgesetzt. Mit der geringeren Anzahl an betroffenen Personen geht eine Reduzierung der zu erwartenden Risiken einher.

Bei der Maßnahmenwahl ist jedoch zu berücksichtigen, dass verkehrliche Maßnahmen (z. B. eine Geschwindigkeitsreduktion, ein Tag-Fahrverbot für Gefahrgüter) eine Überwachung der Befolgung bedürfen. Die baulichen Maßnahmen, wie z. B. Notausgänge und eine automatische Brandmeldeanlage sind bereits mit ihrer Anordnung wirksam.

Abschließende Aussagen hinsichtlich möglicher Kompensationsmaßnahmen können jedoch aufgrund der Wechselwirkungen der relevanten Parameter ohne eine detaillierte Berechnung nicht getroffen werden.

Ein Anstieg der Verkehrsbelastung auf 30.000 Kfz/d unter der Beibehaltung der Tunnellänge von 395 m würde voraussichtlich zu einer Überschreitung der Grenzkurve führen. Eine Erhöhung des DTV unter Beibehaltung des SV-Anteils wirkt sich zum einen auf die Eintrittshäufigkeiten von Gefahrgutfreisetzungen aus, da von mehr Gefahrguttransporten pro Jahr auszugehen ist. Zum anderen befinden sich mit dem steigenden DTV aber auch mehr Personen im Tunnel, was in der Überlagerung der ermittelten Selbstrettungsbereiche und abhängig vom Verkehrszustand und der Tageszeit zu höheren Schadensausmaßen führt.

Für genauere Aussagen, im Sinne einer quantitativen Bewertung anhand der Grenzkurve, wären zusätzliche Berechnungen ggf. auch unter Berücksichtigung von weiteren Brandorten erforderlich.

## 7.10 Empfehlungen

Im Rahmen der Untersuchung konnten für die Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT die zu erwartenden Risiken in Abhängigkeit ihrer Eintrittshäufigkeit bestimmt werden. Die Eintrittshäufigkeiten wurden unter Berücksichtigung der den Ereignisablauf maßgeblich beeinflussenden Faktoren mit Hilfe von Ereignisbäumen quantifiziert. Hierbei wurde auf eine möglichst transparente Darstellung aller Größen und Berechnungsvorgänge geachtet. Zur Ermittlung des jeweiligen Schadensausmaßes wurden umfangreiche numerische Berechnungen mit unter-

schiedlichen Simulationsprogrammen durchgeführt. Dadurch konnten unter Berücksichtigung der betriebs- und sicherheitstechnischen Einrichtungen wie natürliche Lüftung, Detektion, Notausgangsabstand sowie dem Verkehrszustand räumlich und zeitlich hoch aufgelöst Ausmaße ermittelt werden. Die Berechnungsergebnisse wurden methodisch so aufbereitet, dass sie für das Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR geeignet sind (d. h. auf eine feste Tunnellänge von 1 km normiert, für die die zugehörige Grenzgerade angegeben ist und so Tunnel hinsichtlich ihres Risikos miteinander vergleichbar zu machen). Die Ermittlung der Schadenausmaße und der zugehörigen Eintrittshäufigkeiten hat ergeben, dass die größten Schadenausmaße bei der Detonation von TNT zu erwarten sind. Demgegenüber fallen die maximalen Schadenausmaße infolge eines Brandereignisses mit Benzin und Propan oder dem Austritt von Chlor geringer aus. Darin spiegelt sich der Sachverhalt wider, dass die Ausbreitung toxischer Stoffe bei Freisetzungen mit Benzin, Propan und Chlor langsamer abläuft als bei TNT. Allerdings sind die zugeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Benzin deutlich höher, so dass deren Gesamtrisiko höher einzustufen ist. Besonders die Gefahrgutklasse 3 (Leitstoff: Benzin) mit ihren relativ hohen Häufigkeiten ist der bestimmende Faktor für die ADR-Kategorisierung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch keines der untersuchten Szenarien die Grenzwerte zur weiteren Kategorisierung von Tunneln erreicht werden und somit keine Beschränkung hinsichtlich des Transports von Gefahrgütern durch die Tunnel Eisgrub angezeigt ist. Den Tunneln kann auf Basis dieser Untersuchung und unter Berücksichtigung der angenommenen geometrischen und verkehrlichen Verhältnisse die Kategorie A zugeordnet werden.

Eine Tunnelverlängerung auf 500 m in Kombination mit einer Verkehrsbelastung von 30.000 Kfz/24h lässt eine Überschreitung der Grenzkurve erwarten, so dass hier zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden müssten. Diese können sowohl baulicher (z. B. zusätzlicher Notausgang) als auch verkehrlicher (z. B. Geschwindigkeitsreduktion) Art sein. Verlässliche Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit lassen sich dazu jedoch nur mit einer detaillierteren Betrachtung treffen.

Bei einem Anstieg des DTV auf 30.000 Kfz/24h unter Beibehaltung der Tunnellänge von 395 m kann davon ausgegangen werden, dass es aufgrund der erhöhten Anzahl an Gefahrguttransporten pro Jahr und einer größeren Anzahl an betroffenen Personen im Ereignisfall zu einer Überschreitung der Grenzkurve kommt. Auch in diesem Szenario sind für verlässlichere Aussagen hinsichtlich der zu erwartenden Risiken zusätzliche Berechnungen (ggf. unter Berücksichtigung weiterer Brandorte) erforderlich.

Es kann davon ausgegangen werden, dass mit den aufgeführten Maßnahmen die Kategorie A, keine Beschränkungen für Gefahrgüter, für die Tunnel Eisgrub erreicht werden.

## 8 Literatur

- [ABNL 2004] Baltzer, W.; Barleon, M.; Becher, Th.; Mayer, G.; Riepe, W.; Steinauer, B.; Zimmermann, U.; Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) Hrsg.: Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Systematik der Leitsysteme, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 892, 2004
- [ASR 2006] Mayer, G.; Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation; Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- [BSDT 2005] Steinauer, B.; Mayer, G.; Brake, M.; Haack, A.; Schreyer, J.; Grünewald, M.; Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) Hrsg.: Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 925, Bonn, 2005
- [BV FE 2006] Mayer, G.; Kündig, P.; Steinauer, B.; Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) Hrsg.: Brandversuche in Tunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, FE 03.375/2004/FGB, 2006
- [EG 2004 54] Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, in: Amtsblatt der Europäischen Union L 201 vom 7.6.2004
- [ESCAPE 2007] Mayer, G.; Steinauer, B.: 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, 2007
- [FE ADR 2009] Baltzer, W.; Imhof, D.; Mayer, G.; Riepe, W.; 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](http://www.bast.de)
- [HBS 2009] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) Hrsg.: HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Ausgabe 2001, Fassung 2009, Köln, 2009
- [HBS 2015] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) Hrsg.: HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Ausgabe 2015, Köln, 2015
- [HPLAN 2016] Straßenbauverwaltung Freistaat Bayern, Staatliches Bauamt Landshut; Höhen- und Lageplanausschnitt Fall 1a Bereich Bau-km 50+550 – 53+000 Variante A, B15 OSU-Landshut, Bau-km 48+110 bis 65+199 / 70+775 / 72+639, M 1: 5000/500, Arbeitsstand vom 10.08.2016

- [MTFVTP 1995] Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP), im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration, 1995
- [QBRT 2006] Haastert, J.; Mayer, G.: Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43, 2006
- [QSB OFW 2003] Baltzer, W.; Mayer, G.: Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Band 40, Bauverlag BV, 2003
- [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 30.03.2016
- [SB EEA 2014] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Entwurfstechnische Empfehlungen für Autobahntunnelstrecken, Schlussbericht und Anlagen zu FE 02.0333/2011/EGB, Dezember 2014
- [SB FE 2006] Baltzer, W.; Mayer, G.; Mühlberger, A.; Pauli, P.; Riepe, W.; Steinauer, B.; Zimmermann, U.; Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) Hrsg.: Gestaltung von Notausgängen in Straßentunneln, FE 03.390/2005/FGB, 2006
- [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, Mai 2009
- [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
- [SB LF 2008] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5), Bonn, 2008
- [StVO] Straßenverkehrsordnung (StVO) vom 6. März 2013 (BGBl I S. 3679, zuletzt geändert am 15.09.2015 (BGBl. I S. 1573))

- [TAC 1998] Amundsen, F; Ranes, G.; Traffic Accidents and Carfires in Norwegian Tunnels, Safety in Road and Rail Tunnels, Third International Conference France, 1998
- [TACP 1995] Purser, D.A.: Toxicity Assessment of Combustion Products, in: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, Section 2, Chapter 8, 1995
- [VSQRA 2008] Mayer, G.: 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, 2008
- [VU 2015] Kurzak, H.: Verkehrsuntersuchung Bundesfernstraße B15neu Entlastung von Landshut, Variantenvergleich Fall 1 - Fall 9 als Grundlage für das Dialogforum, Teil A und Teil B sowie Anlagen, München, 22. September 2015
- [VZ 2016] Schuh & Co. GmbH: Verkehrszählung Landshut Gefahrguttransporte Juni 2016 im Auftrag der Autobahndirektion Süd, Germering, 29. Juni 2016

## Anhang 1: Anhang zur Gefahrenanalyse

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Panne</b>
<b>Szenario Panne</b>		
<b>Referenzszenario</b> Ein Pkw bleibt mit einem technischen Defekt auf dem rechten Fahrstreifen liegen und behindert den nachfolgenden Verkehr.		
<b>Worst case Szenario</b> Ein Lkw bleibt während Wartungsarbeiten, bei welchen ein Fahrstreifen gesperrt ist, liegen. Ein Passieren der Stelle ist nicht möglich. → Vollstau in einer Tunnelröhre bis ein Abschleppen des defekten Fahrzeugs möglich ist → Kollision durch unerlaubtes Ausweichen über den gesperrten Fahrstreifen (siehe Kollisionsszenario PG_Kollision) → Technischer Defekt führt zu einem Brand (siehe Brandszenario PG_Brand)		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reifenpanne, technischer Defekt an der Elektrik, Kraftstoffmangel etc. führen zum Liegenbleiben des Fahrzeugs</li> <li>▪ Überhitzung von Motor, Bremsen, Defekt an der Elektrik etc. führen zum Ausfall und zum Brand</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine Personenschäden (bei Brand siehe PG_Brand)		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden an Infrastruktur
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b>  <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notrufsprechstellen an Portalen</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon oder Notrufsprechstelle → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung der WLZ zur Warnung der Verkehrsteilnehmer oder Sperrung des Tunnels über WLZ und WVZ</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsüberwachung (z. B. durch Schleifen) zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten → Detektion von zähfließendem Verkehr/Stau und ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ ereignisorientierte Videoüberwachung zur visuellen Überprüfung der Situation im Tunnel</li> <li>▪ Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur Erkennung von Stör- und Notfällen → zeitverkürzte Erkennung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs ohne Staubildung, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ zusätzliche WVZ vor dem Tunnel → zur Gefahrenwarnung und Geschwindigkeitsdrosselung bei manueller Meldung oder automatischer Detektion, somit Reduzierung von Auffahrkollisionen</li> <li>▪ Notrufstationen im Tunnel → Möglichkeit der Meldungsabgabe im Tunnel zu einer ständig besetzten Stelle und Einleitung von Maßnahmen durch diese</li> <li>▪ Überwachung der Notrufstationen → Aufschalten eines Videobildes, automatische Warnmeldung und ggf. Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit, um Auffahrkollisionen (Folgekollision) zu reduzieren</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b>  <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein Pannenszenario ist erfahrungsgemäß, wie auf der freien Strecke, eine der häufigsten verkehrlichen Störungen. → Aufgrund der Trassierung mit 5 % Längsneigung kann es im Streckenbereich der Tunnel zu häufigeren Pannen/Defekten kommen.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Da in den Tunneln keine Pannenbuchten und Seitenstreifen vorhanden sind, ist durch ein defektes Fahrzeug eine Beeinträchtigung des nachfolgenden Verkehrs gegeben.</li> <li>▪ Pannenfahrzeuge führen zu starken Behinderungen. Ausweichmanöver und Verzögerungen sind der Regelfall. Diese gehen mit einer direkten Kollisionsgefahr einher.</li> <li>▪ Pannen haben daher ein hohes Eskalationspotenzial, insbesondere für Kollisionen.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die geplanten Notrufsprechstellen an den Portalen dienen der Meldung einer Panne.</li> <li>▪ Die WLZ dienen als Hinweis auf die Gefahr für den nachfolgenden Verkehr, jedoch werden diese erst manuell nach Ereignismeldung geschaltet.</li> <li>▪ Mithilfe der WLZ und WVZ können die Tunnel nach manueller Meldung und darauffolgender manueller Schaltung gesperrt werden.</li> <li>▪ Wegen des hohen Eskalationspotenzials können ggf. weitere Maßnahmen sinnvoll sein, um die nachfolgenden Verkehrsteilnehmer frühzeitig zu warnen.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Keine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Panne, da infolge einer Panne keine Schäden zu erwarten sind. Pannen als Ursachen für Unfälle und Brände werden in den Szenarien PG_Kollision und PG_Brand berücksichtigt.		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Kollision</b>
<b>Szenario Kollision ohne Brand</b>		
<b>Referenzszenario</b> Bei einem Überholvorgang kommt es beim Fahrstreifenwechsel zu einem Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6) durch seitliches Touchieren des vorausfahrenden Fahrzeugs. Am Unfall sind 2 Pkw beteiligt. Ein Fahrzeug prallt infolge der Kollision an die Tunnelwand. Es entsteht ein erheblicher Sachschaden an den Fahrzeugen. Personen kommen nicht zu Schaden. Der Unfall führt zu erheblichen Behinderungen des nachfolgenden Verkehrs.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ schwere Kollision unter Beteiligung eines Lkw</li> <li>▪ schwere Kollision unter Beteiligung eines Busses</li> <li>▪ schwere Auffahrkollision mit mehreren Fahrzeugen (Massenunfall) unter Beteiligung von Lkw, Pkw und Bussen</li> <li>▪ schwere Frontalkollision durch Geisterfahrer</li> <li>▪ Kollision während des Einfädelvorgangs vor einem Hindernis (Pannenfahrzeug, verlorene Ladung)</li> <li>▪ schwere Kollision mit der Tunnelkonstruktion</li> <li>▪ Kollision führt zu einem Brand (siehe Brandszenario PG_Brand)</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer, Missachtung der Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Missachtung von Mindestabständen</li> <li>▪ Missachtung von Überholverböten (Lkw)</li> <li>▪ Geisterfahrer</li> <li>▪ Hindernisse, wie z. B. Pannenfahrzeuge oder verlorene Ladung (siehe Pannenszenario PG_Panne oder Hindernisszenario PG_Hindernis)</li> <li>▪ Überhöhe von Lkw</li> <li>▪ Stau infolge von Pannen und außerhalb des Tunnels liegender Ursachen (z. B. Straßensperrung, Starkregen, Hagel, Nebelbildung, Sperrung des nachfolgenden Tunnels)</li> <li>▪ Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern bei besonderen Witterungszuständen</li> <li>▪ Arbeitsunfall bei Wartungsarbeiten mit Folgekollision</li> <li>▪ Aktives Herbeiföhren eines Unfalls in suizidaler Absicht bzw. zur Schädigung Dritter</li> <li>▪ Ausfall der Tunnelbeleuchtung</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> Im Regelfall sind nur geringe Personenschäden zu erwarten. Bei Kollisionen mit Geisterfahrern ist mit einem größeren Schadensausmaß aufgrund der größeren Aufprallenergie zu rechnen. Bei schweren Kollisionen sind 2-3 Todesopfer und bei Massenunfällen oder Beteiligung eines Busses sind bis zu 30 verletzte Personen und mehr möglich.		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> Im Regelfall sind geringe bis mittlere Sachschäden an den Fahrzeugen zu erwarten. Bei schweren Kollisionen sind hohe Fahrzeugschäden sowie Schäden an der Konstruktion und den technischen Einrichtungen zu erwarten.

## Sicherheitsrelevante Aspekte

### vorgesehene Maßnahmen

- Von der Außenleuchtdichte abhängige Adaptionsbeleuchtung → Gewöhnung der Fahrzeugführer an die geringe Innenleuchtdichte im Tunnel
- Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon oder Notrufsprechstelle → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung der WLZ zur Warnung der Verkehrsteilnehmer oder Sperrung des Tunnels über WLZ / WVZ
- Lkw-Überholverbot

### mögliche weitere Maßnahmen

- Verkehrsüberwachung (z. B. durch Schleifen) zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten → Detektion von zählfließendem Verkehr/Stau und ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen
- ereignisorientierte Videoüberwachung zur visuellen Überprüfung der Situation im Tunnel
- Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur Erkennung von Stör- und Notfällen → zeitverkürzte Erkennung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs ohne Staubildung, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen
- zusätzliche WVZ vor dem Tunnel → zur Gefahrenwarnung und Geschwindigkeitsdrosselung bei manueller Meldung oder automatischer Detektion, somit Reduzierung von Auffahrkollisionen (Folgekollision)
- Notrufstationen im Tunnel → Möglichkeit der Meldungsabgabe im Tunnel zu einer ständig besetzten Stelle und Einleitung von Maßnahmen durch diese
- Überwachung der Notrufstationen → Aufschalten eines Videobildes, automatische Warnmeldung und ggf. Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit, um Auffahrkollisionen (Folgekollision) zu reduzieren
- ereignisorientierte Videoüberwachung (bei Stau, Notruf etc.) → zeitverkürzte Erfassung der Situation durch Personal in der ständig besetzten Stelle
- Selbstleuchtende Markierungselemente → visuelle Führung der Fahrzeugführer, insb. bei geringer Verkehrsdichte
- Sicherstellung von klimatischen Bedingungen im Tunnel → Beschlagen von Scheiben und Visieren wird vermieden, z. B. durch mechanische Längslüftung
- Herabsetzen der Geschwindigkeitsbeschränkung → Reduzierung von hohen Differenzgeschwindigkeiten
- Geschwindigkeitsüberwachung → Reduzierung von Geschwindigkeitsverstößen
- Höhenkontrolle im Tunnelvorfeld → Vermeidung von zu hohen Fahrzeugen
- Abstandskontrollen beim Schwerverkehr → erhöhte Einhaltung von Mindestabständen

**Gefahrenbereich: passive Gefährdung**

**PG\_Kollision**

## Schlussfolgerungen und Beurteilung

### Abschätzung der Häufigkeit

- Kollisionen ohne Personenschäden sind in Tunneln im Vergleich zu anderen Schadenereignissen relativ häufig.  
→ Infolge der hohen Längsneigung von 5 % ist ohne Maßnahmen eine erhöhte Kollisionsrate zu erwarten.

### Abschätzung der Relevanz

- Die Gefällestrecke lässt erwarten, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit häufiger überschritten wird. Dadurch ist eine erhöhte Unfallschwere möglich.
- Die Steigungsstrecke führt zu einem verlangsamten Schwerverkehr und damit zu höheren Differenzgeschwindigkeiten zwischen Pkw und Lkw. Dies kann zu Auffahrunfällen bzw. Unfällen durch ausweichende Fahrzeuge führen. Eine Beteiligung von Lkw führt zu einem erhöhten Schadenausmaß.
- Pannenfahrzeuge beeinträchtigen den nachfolgenden Verkehr, wodurch sich Ausweichmanöver sowie Staus mit einem erhöhten Unfallpotenzial ergeben.
- Unfälle in suizidaler Absicht lassen sich nicht vollständig verhindern. Senkrecht zur Fahrtrichtung stehende Wände sind nicht vorhanden.
- Wegen der vorliegenden Längsneigung von 5 % ist mit einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit im Betrieb zu rechnen, diese sollte berücksichtigt werden.

### Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen

- Mithilfe der WLZ können die Verkehrsteilnehmer im Kollisionsfall erst nach manueller Meldung und darauffolgender manueller Schaltung gewarnt werden und ihr Verhalten an die jeweilige Situation anpassen.
- Mithilfe der WLZ und WVZ können die Tunnel nach manueller Meldung und darauffolgender manueller Schaltung gesperrt werden.
- Mit Hilfe der USV-Anlage wird sichergestellt, dass bei einer Unterbrechung der Stromversorgung die Notbeleuchtung im Tunnel funktionsfähig bleibt. Somit werden Kollisionen infolge Ausfall der Netzversorgung der Beleuchtung vermieden.

## Fazit

Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Kollision ist unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung durchzuführen.

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_Brand</b>
<b>Szenario Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)</b>	
<p><b>Referenzszenario</b></p> <p>Infolge eines technischen Defekts kommt es bei einem Pkw zu einem Brand der Elektrik. Der Fahrzeugführer kann das Fahrzeug am rechten Fahrbahnrand zum Stehen bringen und sich aus dem Fahrzeug retten. Der Brand breitet sich rasch mit starker Rauchentwicklung aus und es kommt zu einem Fahrzeugvollbrand (5 MW). Fahrzeuge vor der Brandstelle können aus dem Tunnel ausfahren, Fahrzeuge hinter der Brandstelle stauen sich. Es kommt zu keinen Personenschäden. Die technische Ausstattung wird im Bereich des Brandherds im Wesentlichen zerstört, an dem Bauwerk entstehen keine erheblichen Schäden.</p>	
<p><b>Worst case Szenario</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fahrzeugvollbrand eines voll beladenen Lkw infolge technischen Defekts</li> <li>▪ großer, schwer kontrollierbarer Brand infolge einer schweren Kollision unter Beteiligung eines Lkw, große Behinderung durch Rauchentwicklung</li> <li>▪ großer, schwer kontrollierbarer Brand (<math>\geq 100</math> MW) infolge einer schweren Kollision an einem Stauende unter Beteiligung eines Lkw, große Behinderung durch giftige Rauchentwicklung, Stau in der gesamten Tunnelröhre, Übertragung des Brandes auf mehrere Lkw, Pkw und Busse infolge der dicht zusammenstehenden Fahrzeuge</li> </ul>	
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ technischer Defekt an Fahrzeug, Motor oder Elektrik</li> <li>▪ Überhitzung von Bremsen (z. B. aufgrund technischem Defekt)</li> <li>▪ Entzündung von Ladungen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer oder Missachtung der Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Mindestabständen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Überholverböten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Auffahren auf ein Stauende</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Hindernisse, wie z. B. Pannenfahrzeuge oder verlorene Ladung</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern bei besonderen Witterungszuständen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Geisterfahrer</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch aktives Herbeiführen eines Unfalls in suizidaler Absicht bzw. zur Schädigung Dritter</li> <li>▪ Brand infolge von Wartungsarbeiten bei gesperrter oder teilgesperrter Tunnelröhre</li> <li>▪ Brand infolge eines Arbeitsunfalls</li> <li>▪ Explosion von Gasflaschen bei Wartungsarbeiten</li> <li>▪ Brandstiftung</li> </ul>	
<p><b>Konsequenzen Personenschäden</b></p> <p>Bei kleinen Bränden sind geringe Personenschäden zu erwarten.</p> <p>Bei Bränden mit starker Rauchausbreitung oder Brand mehrerer Fahrzeuge sind hohe Personenschäden, insbesondere bei Vollstau im Tunnel zu erwarten.</p>	<p><b>Konsequenzen Sachschäden</b></p> <p>Im Regelfall hohe Sachschäden an den Fahrzeugen und mittlere Sachschäden an der technischen Ausstattung.</p> <p>Bei großen Bränden hohe Sachschäden an den Fahrzeugen und dem Tunnel, mehrmonatige Sanierungsarbeiten sind zu erwarten.</p>

Gefahrenbereich: passive Gefährdung	PG_Brand
<p><b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b></p> <p><u>vorgesehene Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Tunnelsperrung durch WLZ / WVZ → Verhinderung des Einfahrens weiterer Fahrzeuge in den Tunnel zur Begrenzung der Anzahl von Personen in der betroffenen Röhre und Verbesserung der Erreichbarkeit des Brandortes für Einsatzdienste</li><li>▪ Fluchtwegkennzeichnungsbeleuchtung → Wegweisung zum nächsten Notausgang/Portal (sicherer Bereich)</li><li>▪ Alarm- und Gefahrenabwehrpläne sowie Feuerwehrpläne → geregelte Fremdrettung und Brandbekämpfung</li><li>▪ Löschwasserversorgung über Hydranten an den Portalen → Brandbekämpfung durch Einsatzdienste</li><li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon und Notrufsprechstelle → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung der WLZ / WVZ zur Tunnelsperrung</li><li>▪ USV-Anlage → Schutz vor einem Ausfall der Sicherheitseinrichtungen</li></ul> <p><u>mögliche weitere Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ manuelle Brandmeldeeinrichtungen → Möglichkeit der Brandmeldung und automatischen Tunnelsperrung bei Auslösung</li><li>▪ automatische Brandmeldeeinrichtungen → Detektion von Bränden und automatische Alarmierung der Einsatzdienste, Sperrung des Tunnels, Schaltung der Tunnelbeleuchtung etc.</li><li>▪ ereignisorientierte Videoüberwachung zur visuellen Überprüfung der Situation im Tunnel → zeitverkürzte Erfassung der Situation durch Personal in der ständig besetzten Stelle</li><li>▪ Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur Erkennung von Stör- und Notfällen → zeitverkürzte Erkennung einer Störung und frühzeitiges Ergreifen von Maßnahmen, schon vor Ausbruch eines Brandes</li><li>▪ Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur Erkennung von Bränden → zeitverkürzte Erkennung eines Brands und frühzeitiges Ergreifen von Maßnahmen</li><li>▪ Sichttrübungsmessung, CO-Wert-Erfassung → Nutzung zur Detektion von Bränden</li><li>▪ mechanische Sperreinrichtungen (Schranken) → Einfahrt von Fahrzeugen in den Gefahrenbereich wird verhindert</li><li>▪ Notrufstationen mit Feuerlöscher → Notrufmeldung und Möglichkeit der Bekämpfung von kleinen Bränden</li><li>▪ Überwachung der Notrufstationen → Aufschalten eines Videobildes, automatische Warnmeldung und ggf. Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit, um Auffahrkollisionen (Folgekollision) zu reduzieren</li><li>▪ Anlage von Querschlägen → Verkürzung der Fluchtwege und so effizientere Nutzung der Selbstrettungsphase</li><li>▪ Lautsprecheranlage für Durchsagen → Fluchtaufforderung für Tunnelnutzer</li><li>▪ Einsprechmöglichkeit für Verkehrsfunk → Fluchtaufforderung für Tunnelnutzer</li><li>▪ Orientierungsbeleuchtung → Möglichkeit der Orientierung für flüchtende Personen in verrauchten Abschnitten</li><li>▪ selbstleuchtende Markierungselemente → Verbesserung der Orientierungsmöglichkeit im verrauchten Bereich</li><li>▪ Strahlventilatoren im Tunnelraum → mechanische Längslüftung zur Beeinflussung der Rauchausbildung</li><li>▪ Verbesserung der technischen und personellen Ausstattung der vorhandenen Feuerwehren → Erhöhung der Effizienz bei der Fremdrettung</li><li>▪ Automatische Brandbekämpfungsanlagen → Senkung der Brandlast, Brandverzögerung</li><li>▪ Gewährleistung der Mobilfunkversorgung im Tunnel → Möglichkeit der Notrufmeldung über Mobilfunk</li><li>▪ alle Maßnahmen zur Reduktion von Unfallhäufigkeiten (siehe Kollisionsszenario PG_Kollision)</li></ul>	
<p><b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b></p> <p><u>Abschätzung der Häufigkeit</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Brände sind in Tunneln relativ seltene Ereignisse. In den meisten Fällen handelt es sich um Kleinstbrände ohne Personenschäden.</li><li>▪ Aufgrund der hohen Längsneigung (5 %) über einen längeren Streckenabschnitt kann es auf der Steigungs- und Gefälle-strecke vermehrt zu technischen Defekten mit Brandfolge infolge starker Beanspruchung der Fahrzeuge kommen.</li><li>▪ Die höheren Differenzgeschwindigkeiten zwischen Lkw und Pkw auf der Steigungsstrecke führen zu erhöhten Aufprallenergien im Kollisionsfall und damit zu einem Anstieg der Brandrate.</li><li>▪ Auf den Gefällestrecken ist eine Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu erwarten. Diese führt im Kollisionsfall aufgrund höherer Aufprallenergien (z. B. mit anderen Fahrzeugen oder der Tunnelwand) zu einer höheren Unfallschwere und einer steigenden Brandgefahr.</li></ul> <p><u>Abschätzung der Relevanz</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Die häufiger auftretenden technischen Defekte führen zu einer Erhöhung der Brandrate</li><li>▪ Die erhöhten Aufprallenergien im Kollisionsfall bewirken eine steigende Brandgefahr.</li><li>▪ Eine mechanische Brandfalllüftung ist aufgrund der kurzen Tunnellängen und der schnellen Rauchausbildung infolge der Längsneigung i. d. R. keine wirksame Maßnahme zur Erzielung von Verbesserungen in der Selbstrettungsphase</li><li>▪ Infolge der Steigung und der damit verbundenen erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich eine zusätzliche Gefahr hinsichtlich des Ausmaßes eines Brandes.</li><li>▪ Schäden am Bauwerk können die Dauerhaftigkeit bzw. Standfestigkeit des Tunnels erheblich gefährden.</li></ul> <p><u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Aufgrund der erhöhten Längsneigung von 5 % sind gemäß den RABT 2016 zusätzlich zu den geforderten Sicherheitsmaßnahmen, welche für die Tunnel Nord und Süd vorgenommen werden (s.o.), weitere Maßnahmen zu beurteilen (z. B. Anlage von Notausgängen, frühzeitige Detektion und Alarmierung der Tunnelnutzer etc.).</li></ul>	
<p><b>Fazit</b></p> <p>Eine weiterführende Risikoanalyse zum Szenario Brand unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung von 5 % wird vorgenommen.</p>	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_GG-Brand</b>
<b>Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Beispiel Brand</b>		
<p><b>Referenzszenario</b> Nach einem Unfall mit einem Tankfahrzeug versagen alle Behälterkammern und ca. 10 m³ Benzin werden freigesetzt. Es bildet sich eine Benzinlache, die sich zeitverzögert entzündet.</p>		
<p><b>Worst case Szenario</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung von großen Mengen brennbarer Flüssigkeiten</li> <li>▪ Brand eines Gastransporters (z. B. Propan), Erhitzung des Tanks durch den Brand mit folgendem Gaswolkenbrand oder Freistrahlerbrand</li> </ul>		
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unfall</li> <li>▪ Überhitzung von Bremsen (technischer Defekt)</li> <li>▪ Entzündung von Ladungen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer oder Missachtung von Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Mindestabständen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Auffahren auf ein Stauende</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Hindernisse, wie z. B. Pannenfahrzeuge</li> <li>▪ Brand von Tankfahrzeug infolge von Wartungsarbeiten (Betankung von Maschinen) bei gesperrter oder teilgesperrter Tunnelröhre</li> </ul>		
<p><b>Konsequenzen Personenschäden</b> Großes Ausmaß von Personenschäden</p>		<p><b>Konsequenzen Sachschäden</b> Große Schäden an der Tunnelausstattung bzw. am Tragwerk</p>
<p><b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> Gesonderte Betrachtung</p>		
<p><b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> Gesonderte Betrachtung</p>		
<p><b>Fazit</b> Das Gefahrgutszenario Brand wird in einer gesonderten Gefahrgutrisikoanalyse unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung von 5 % untersucht.</p> <p>Für Gefahrguttransporte durch Straßentunnel sehen die RABT sowie die Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz eine gesonderte Risikobetrachtung vor. Diese ist so durchzuführen, dass unter Anwendung eines zweistufigen Verfahrens gem. dem Forschungsbericht zu FE03.0437/2007/FRB und FE 86.0050/2008 Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 [FE ADR 2009] eine Kategorisierung der Straßentunnel nach dem europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vorgenommen werden kann.</p>		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_GG-Toxizität</b>
<b>Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Toxizität</b>		
<p><b>Referenzszenario</b></p> <p>Nach einem Unfall mit einem Gefahrguttransport wird z. B. eine Chlorgasflasche beschädigt und entleert sich innerhalb einer Minute. Das Schwergas verbreitet sich innerhalb des Tunnels.</p>		
<p><b>Worst case Szenario</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausbreitung einer großen Menge humantoxischer Gase/Flüssigkeiten in kurzer Zeit</li> <li>▪ Ausbreitung einer großen Menge ökotoxischer Gase/Flüssigkeiten in kurzer Zeit → Unfall im Bereich der Steigung, Gas bewegt sich Richtung Tunnelportal, Beeinträchtigung der vermeintlich in Sicherheit befindlichen Personen</li> </ul>		
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kollision durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Kollision durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision durch Missachtung von Überholverböten (Lkw bzw. bei Gegenverkehr)</li> <li>▪ Kollision durch Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision durch Auffahren auf ein Stauende</li> <li>▪ Kollision durch Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge oder verlorene Ladung)</li> <li>▪ Kollision durch Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern bei besonderen Witterungszuständen</li> <li>▪ Leck bzw. technisches Versagen des Transportbehälters</li> </ul>		
<p><b>Konsequenzen Personenschäden</b></p> <p>Großes Ausmaß von Personenschäden</p>		<p><b>Konsequenzen Sachschäden</b></p> <p>Beschränkung der Sachschäden auf die bei der Kollision beteiligten Fahrzeuge.</p>
<p><b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b></p> <p>Gesonderte Betrachtung</p>		
<p><b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b></p> <p>Gesonderte Betrachtung</p>		
<p><b>Fazit</b></p> <p>Das Gefahrgutszenario Toxizität wird in einer gesonderten Gefahrgutrisikoanalyse unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung von 5 % untersucht.</p> <p>Für Gefahrguttransporte durch Straßentunnel sehen die RABT sowie die Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz eine gesonderte Risikobetrachtung vor.</p> <p>Diese ist so durchzuführen, dass unter Anwendung eines zweistufigen Verfahrens gem. dem Forschungsbericht zu FE03.0437/2007/FRB und FE 86.0050/2008 Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 [FE ADR 2009] eine Kategorisierung der Straßentunnel nach dem europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vorgenommen werden kann.</p>		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_GG-Explosion</b>
<b>Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Explosion</b>		
<b>Referenzszenario</b> Nach einem Unfall gerät ein mit 100 kg TNT beladenes Fahrzeug in Brand, durch das eine Explosion ausgelöst wird.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung eines Propantransports, Blevé</li> <li>▪ Explosion einer großen Menge TNT o. ä.</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unfall</li> <li>▪ Überhitzung von Bremsen (z. B. bei langen Gefällestrecken und technischem Defekt)</li> <li>▪ Entzündung von Ladungen</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Missachtung von Überholverböten (Lkw)</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Auffahren auf ein Stauende</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge oder verlorene Ladung)</li> <li>▪ Kollision mit folgender Explosion durch Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern unter besonderen Witterungsbedingungen</li> <li>▪ Explosion von Gasflaschen infolge von Wartungsarbeiten bei gesperrter oder teilgesperrter Tunnelröhre</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> Großes Ausmaß von Personenschäden		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> Große Schäden an der Tunnelausstattung bzw. am Tragwerk.
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> Gesonderte Betrachtung		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> Gesonderte Betrachtung		
<b>Fazit</b> Das Gefahrgutszenario Explosion wird in einer gesonderten Gefahrgutrisikoanalyse unter Berücksichtigung der erhöhten Längsneigung von 5 % untersucht.  Für Gefahrguttransporte durch Straßentunnel sehen die RABT sowie die Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz eine gesonderte Risikobetrachtung vor. Diese ist so durchzuführen, dass unter Anwendung eines zweistufigen Verfahrens gem. dem Forschungsbericht zu FE03.0437/2007/FRB und FE 86.0050/2008 Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 [FE ADR 2009] eine Kategorisierung der Straßentunnel nach dem europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) vorgenommen werden kann.		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Hindernis</b>
<b>Szenario Hindernis</b>		
<b>Referenzszenario</b> Ein Lkw verliert während der Fahrt einen Teil der Ladung, der nachfolgende Verkehr wird behindert.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personen laufen im Tunnel auf der Fahrbahn</li> <li>▪ Tiere befinden sich im Tunnel</li> <li>▪ ein Hindernis führt zu einem Unfall (siehe Kollisionsszenario PG_Kollision)</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ nicht sachgemäße Sicherung von Ladung</li> <li>▪ sich lösende Fahrzeugteile (z. B. Radkappen)</li> <li>▪ Personen verlassen das Fahrzeug bei einer Panne bzw. nach einem Unfall</li> <li>▪ Tiere kommen über die Portale in den Tunnel</li> <li>▪ unbefugte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger und Radfahrer)</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine, im Falle einer Kollision sind Personenschäden möglich		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine, im Falle einer Kollision sind Sachschäden möglich
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Notrufsprechstellen an Portalen</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon oder Notrufsprechstelle → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung der WLZ zur Warnung der Verkehrsteilnehmer oder Sperrung des Tunnels über WLZ und WVZ</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsüberwachung (z. B. durch Schleifen) zur frühzeitigen Erkennung von Unregelmäßigkeiten → Detektion von zählfließendem Verkehr/Stau und ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ ereignisorientierte Videoüberwachung zur visuellen Überprüfung der Situation im Tunnel</li> <li>▪ Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur Erkennung von Stör- und Notfällen → zeitverkürzte Erkennung eines Hindernisses ohne Staubbildung, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ zusätzliche WVZ vor dem Tunnel → zur Gefahrenwarnung und Geschwindigkeitsdrosselung bei manueller Meldung oder automatischer Detektion zur Vermeidung von Kollisionen</li> <li>▪ Notrufstationen im Tunnel → Möglichkeit der Meldungsabgabe im Tunnel zu einer ständig besetzten Stelle und Einleitung von Maßnahmen durch diese</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hindernisse z. B. in Form von verlorener Ladung oder Personen auf der Fahrbahn führen häufig zu verkehrlichen Störungen.</li> <li>▪ Eine Nutzung des Tunnels durch unbefugte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger und Radfahrer) wird aufgrund der außerörtlichen Lage als nicht wahrscheinlich angesehen.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hindernisse führen zu starken Behinderungen.</li> <li>▪ Ausweichmanöver und Verzögerungen sind der Regelfall.</li> <li>▪ Hindernisse und Personen auf der Fahrbahn bergen ein hohes Eskalationspotenzial.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mit Hilfe der geplanten Sicherheitsmaßnahmen können keine Hindernisse erkannt werden und der nachfolgende Verkehr kann nicht frühzeitig gewarnt werden. Es liegt daher ein hohes Eskalationspotenzial vor.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Keine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Hindernis, da infolge eines Hindernisses kein Risiko bezüglich der Schadensindikatoren Personen- und Sachschäden zu erwarten ist. Hindernisse als Ursachen für Unfälle und Brände werden in den Szenarien PG_Kollision und PG_Brand berücksichtigt.		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Stau</b>
<b>Szenario Stau auf freier Strecke, Rückstau in den Tunnel</b>		
<b>Referenzszenario</b> Auf freier Strecke unmittelbar hinter dem Ausfahrportal des vorgelegenen Tunnels kommt es infolge eines Unfalls zu Stauungen. Das Stauende liegt im dahinterliegenden Tunnel bzw. vor dessen Einfahrportal.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Richtungsfahrbahn ist im Anschluss an die Tunnel gesperrt, der Verkehr staut sich über lange Zeit in den Tunneln. Aufgrund des Rückstaus entsteht in den Tunneln durch laufende Motoren eine erhöhte CO-Konzentration in der Tunnelluft und die Sichttrübung steigt an.</li> <li>Es kommt an einem Stauende zu einer schweren Auffahrkollision (siehe Kollisionsszenario PG_Kollision) und ggf. zu einem Brand (siehe Brandszenario PG_Brand).</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Unfall außerhalb des Tunnels</li> <li>Straßensperrung außerhalb des Tunnels</li> <li>Behinderung durch Starkniederschlag oder Sturmschäden auf der freien Strecke</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> Personenschäden durch erhöhte CO-Konzentration		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden an Infrastruktur
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon oder Notrufsprechstelle → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung der WLZ zur Warnung der Verkehrsteilnehmer oder ggf. Tunnelsperrung über WLZ und WVZ</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verkehrsüberwachung durch Schleifen oder Videodetektion (automatische Bildauswertung) zur frühzeitigen Erkennung von zähfließendem Verkehr/Stau            → automatische Schaltung von Warnhinweisen oder Tunnelsperrung            → bei zähfließendem Verkehr/Stau im vorgelegenen Tunnel → frühzeitige Warnung der Verkehrsteilnehmer bzw. Sperrung des nachgelegenen Tunnels</li> <li>zusätzliche WVZ vor dem Tunnel → zur Gefahrenwarnung und Geschwindigkeitsdrosselung bei manueller Meldung oder automatischer Detektion, somit Reduzierung von Auffahrkollisionen (Folgekollision)</li> <li>Sichttrübungsmessung, CO-Wert-Erfassung → bei Grenzwertüberschreitung Warnung der Tunnelnutzer</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Regelmäßig stockender Verkehr/Stau sind für die Tunnel Nord und Süd infolge der Lage im Netz nicht zu erwarten.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stau hat ein hohes Potenzial für Folgeereignisse (z. B. Auffahrkollisionen)</li> <li>Ein Stau im Tunnel ist im Gegensatz zu Stau auf der freien Strecke infolge schlechterer Lichtverhältnisse schwieriger zu erkennen und besitzt infolgedessen ein erhöhtes Eskalationspotential.</li> <li>Ein Stau im Tunnel kann zu einem Anstieg der Sichttrübung und zu erhöhten CO-Konzentrationen in der Atemluft führen. Diese können tödliche Vergiftungen der Tunnelnutzer zur Folge haben.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit den geplanten Sicherheitsmaßnahmen können Unregelmäßigkeiten im Verkehrsfluss nicht detektiert werden und es kann keine Warnung des nachfolgenden Verkehrs erfolgen.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Aufgrund der geringen zu erwartenden Stauhäufigkeit ergibt sich kein erhöhtes Risiko. Weitere Analysen hinsichtlich der Szenarien Kollision und Brand, als Folge eines Staus auf der freien Strecke bzw. eines Rückstaus in die Tunnel, werden unter den Szenarien PG_Kollision und PG_Brand berücksichtigt.		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Betrieb</b>
<b>Szenario Betriebsart abweichend vom Regelbetrieb</b>		
<b>Referenzszenario</b> Im Zuge von Wartungsarbeiten an der Tunnelbeleuchtung wird eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer eingerichtet. Ein Fahrstreifen der Richtungsfahrbahn ist gesperrt.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eine komplette Röhre ist für außerordentliche Sanierungsarbeiten gesperrt und der Verkehr wird umgeleitet. Die Erreichbarkeit für Einsatzdienste ist eingeschränkt.</li> <li>▪ Die Arbeitsstellen sind nicht fachgerecht abgesichert.</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wartungsarbeiten</li> <li>▪ Erhaltungsmaßnahmen</li> <li>▪ Kontrollen</li> <li>▪ Reparaturarbeiten</li> <li>▪ Bauwerkssanierung</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine Personenschäden		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsstelleneinrichtung nach Regelwerk</li> <li>▪ Umleitung des Verkehrs im Falle der Sperrung statt Gegenverkehrsbetrieb in der freien Röhre</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sicherstellung einer jederzeit ungehinderten Erreichbarkeit der Tunnelportale von Einsatzdiensten</li> <li>▪ Ergänzung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) mit Wechselverkehrszeichen (WVZ) → Möglichkeit zur Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Behinderungen und Vermeidung von Folgeunfällen</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten führen regelmäßig zu vom Regelbetrieb abweichenden Verkehrsführungen.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsstellen und daraus resultierende Behinderungen haben im Tunnel ein hohes Eskalationspotenzial (Unfall, Brand).</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Vorschriften zur Absicherung von Arbeitsstellen dienen einem möglichst reibungsfreien Verkehrsfluss, Behinderungen können jedoch nicht vermieden werden.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Aus einer eingeschränkten Befahrbarkeit der Richtungsfahrbahnen ergibt sich kein erhöhtes Risiko. Unfälle und Brände infolge von Arbeitsstellen und besonderen Verkehrsführungen werden in den entsprechenden Szenarien PG_Kollision und PG_Brand berücksichtigt.		

**Hinweis:**

Die Anhänge 2 und 3 zur Sicherheitsbewertung mit insgesamt 327 Seiten schematisch dargestellter Berechnungsergebnisse sind den Unterlagen nicht beigelegt.

Bei Interesse können diese, wie auch alle anderen Unterlagen zum Raumordnungsverfahren, auf der Homepage <http://www.ou-landshut.de> betrachtet und im PDF-Format heruntergeladen werden.