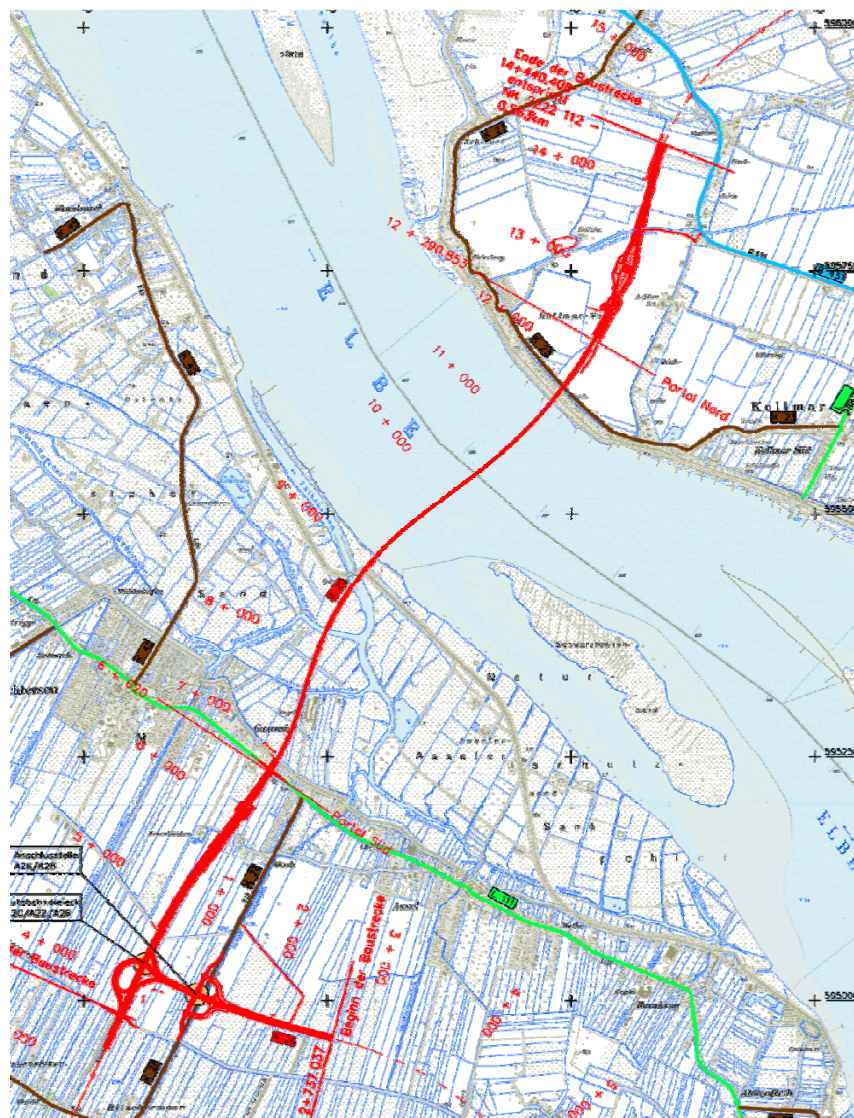


Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein

# Elbquerung BAB A 20 bei Glückstadt Risikoanalyse



August 2010

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
1.1	Projektdaten	7
1.1.1	Lage	7
1.1.2	Geometrische Verhältnisse	8
1.1.3	Verkehrsaufkommen	10
1.2	Analysetiefgang	11
<b>2</b>	<b>GEFAHRENANALYSE</b>	<b>13</b>
2.1.1	Zielsetzung und Abgrenzung	13
2.1.2	Methodik und Vorgehen	13
2.2	Gefährdungsmatrix	14
2.3	Gefahrenanalyse relevanter Szenarien	20
2.3.1	Szenario Panne	21
2.3.2	Szenario Kollision ohne Brand	22
2.3.3	Szenario Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)	24
2.3.4	Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Explosion	27
2.3.5	Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Brand	28
2.3.6	Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Toxizität	29
2.3.7	Szenario Hindernis	30
2.3.8	Szenario Stau auf freier Strecke, Rückstau in den Tunnel	31
2.3.9	Szenario Betriebsart abweichend von Regelbetrieb	32
2.4	Ergebnisse der Gefahrenanalyse	33
<b>3</b>	<b>QUANTITATIVE RISIKOANALYSE ZUR LÄNGSNEIGUNG &gt; 3%</b>	<b>34</b>
3.1	Ausgangslage und Zielsetzung	34
3.2	Vorgehensweise	34
3.2.1	Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten	34
3.2.2	Schadensausmaßermittlung	35
3.2.3	Risikoermittlung	37
3.3	Untersuchungsvarianten	37
3.3.1	Referenzunnel (Referenzfall)	37
3.3.2	Untersuchungstunnel (Nullfall)	39
3.3.3	Untersuchungstunnel mit verkürzter Detektion (Planfall 1)	39
3.3.4	Untersuchungstunnel mit stationärer Geschwindigkeitsüberwachung (Planfall 2)	40

---

<b>3.4</b>	<b>Untersuchungsszenarien</b>	<b>40</b>
3.4.1	Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb	40
3.4.2	Brandort	40
3.4.3	Brandleistung (5 MW, 30 MW, 100 MW)	40
3.4.4	Zeitraum (Tag/Nacht)	41
3.4.5	Verkehrszustände (Stau / freier Verkehr)	41
3.4.6	Detektion	42
3.4.7	Aktivierung des Lüftungssystems	42
3.4.8	Erhöhtes Schadensausmaß	42
3.4.9	Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien	42
<b>3.5</b>	<b>Modellierung der Lüftungsanlagen</b>	<b>45</b>
3.5.1	Bemessungsbrandleistung	45
3.5.2	Anzahl und Anordnung der Rauchklappen	45
<b>3.6</b>	<b>Numerische Ausbreitungsberechnung / Brandsimulation</b>	<b>46</b>
3.6.1	Mathematisches Modell	46
3.6.2	Algorithmus	47
3.6.3	Modellierung der Tunnel (Preprocessing)	48
3.6.3.1	Tunnelgeometrie	48
3.6.3.2	Längsneigung	49
3.6.3.3	Ventilation und Rauchabsaugung	50
3.6.3.4	Brandstelle / Brandherd	51
3.6.3.5	Brandleistung	51
3.6.3.6	Rauchmenge	52
3.6.3.7	Simulationsdauer	52
3.6.4	Simulationsergebnisse (Postprocessing)	53
3.6.4.1	Temperaturverteilung 30 MW Brand	53
3.6.4.2	Rauchausbreitung 30 MW Brand	59
3.6.4.3	Sichtweiten 30 MW Brand	65
3.6.4.4	CO-Ausbreitung 30 MW Brand	70
<b>3.7</b>	<b>Mikroskopische Verkehrsflusssimulation</b>	<b>75</b>
3.7.1	Modell	76
3.7.1.1	Verkehrsflussmodell	76
3.7.1.2	Stationäre Geschwindigkeitsüberwachung	77
<b>3.8</b>	<b>Risikoberechnung</b>	<b>80</b>
3.8.1	Häufigkeitsermittlung	81
3.8.2	Ausmaßermittlung	83
3.8.2.1	Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit	83
3.8.2.2	Toxizität von Brandgasen	84

---

3.8.2.3 Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus	85
3.8.2.4 Bestimmung von Selbstrettungsbereichen	86
3.8.2.5 Bestimmung von Personendichten	87
3.8.2.6 Schadensausmaßbestimmung	89
3.8.3 Risikoermittlung	89
<b>3.9 Untersuchungsergebnisse</b>	<b>90</b>
3.9.1 Ermittlung der Häufigkeiten $H_0$ der Initialereignisse	90
3.9.2 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ im Ereignisablauf	91
3.9.2.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Brand	91
3.9.2.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten $P_i$ infolge Kollision	93
3.9.3 Ausmaßabschätzung	94
3.9.3.1 Schadensausmaße infolge Brand	95
3.9.3.2 Schadensausmaße infolge Kollision	99
3.9.4 Risikoermittlung (H-A-Diagramm)	100
3.9.5 Risikowerte	103
3.9.6 Kostenwirksamkeit	106
<b>3.10 Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>109</b>
<b>4 RISIKOANALYSE BESONDERE CHARAKTERISTIK</b>	<b>113</b>
<b>4.1 Ausgangslage und Zielsetzung</b>	<b>113</b>
<b>4.2 Vorgehen</b>	<b>113</b>
<b>4.3 Risikoanalyse</b>	<b>115</b>
4.3.1 Besondere Charakteristik des Tunnels	115
4.3.2 Ereignisbaumanalyse: Szenario Kollision	117
4.3.3 Ereignisbaumanalyse: Szenario Brand	122
4.3.4 Ergebnisse	127
<b>4.4 Kosten-Wirksamkeitsanalyse zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen</b>	<b>128</b>
4.4.1 Zusammenstellung möglicher Maßnahmen	128
4.4.2 Zu untersuchende Maßnahmen	130
<b>4.5 Fazit</b>	<b>130</b>
<b>5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>131</b>
<b>6 LITERATUR / QUELLEN</b>	<b>133</b>

## 1 Einleitung

Die BAB A 20 ist Bestandteil des Transeuropäischen Straßennetzes (TERN) und stellt eine wichtige Ost-West-Verbindung zwischen Polen und Westeuropa entlang der Ostseeküste dar. Sie reicht z. Zt. etwa von Weede bei Bad Segeberg bis zum Kreuz Uckermark und verknüpft somit auf einer Länge von 330 km die Seehäfen zwischen Hamburg und Stettin. Im vordringlichen Bedarf der Bundesverkehrswegeplanung ist die Weiterführung der BAB A 20 als eine nördliche Umfahrung von Hamburg vom Kreuz Lübeck über Bad Segeberg und Bad Bramstedt nach Stade vorgesehen. Im Bereich von Drochtersen ist beabsichtigt, die BAB A 20 an die geplante BAB A 22 anzuschließen, wodurch eine direkte Verbindung nach Bremerhaven möglich wird (siehe Abbildung 1). Zwischenzeitlich wurde die A 22 umbenannt in A20.

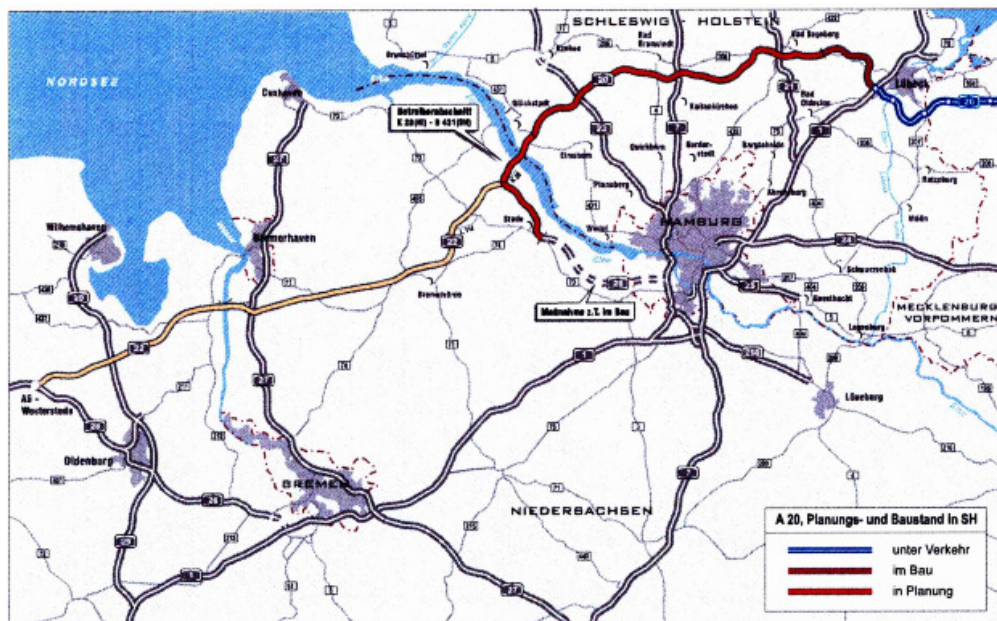


Abbildung 1. A 20 Nordumfahrung Hamburg (Stand 05.2005)

Für die Elbquerung im Zuge der BAB A20 bei Glückstadt werden Risikoanalysen nach den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, Ausgabe 2006 (RABT 2006) wegen der Überschreitung von 3 % Längsneigung<sup>1</sup> im

<sup>1</sup> In den RABT [RABT 2006] wird wegen des höheren Risikos empfohlen, die Längsneigung auf maximal 3 % zu begrenzen (RABT Kap. 2.2). Die RAA [RAA 2008] begrenzt die maximale Längsneigung

nördlichen Streckenabschnitt und zur Berücksichtigung der besonderen Charakteristiken<sup>2</sup> des geplanten Tunnels durchgeführt. Als Grundlage für diese Risikoanalysen dienen die Ergebnisse einer Gefahrenanalyse.

---

ebenfalls auf 3 % (RAA Kap. 8.5.2), empfiehlt jedoch für Tunnelabschnitte, die länger als 500 m sind, eine maximale Längsneigung von 2,5 % nicht zu überschreiten.

<sup>2</sup> nach RABT Abschnitt 0.5 [RABT 2006].

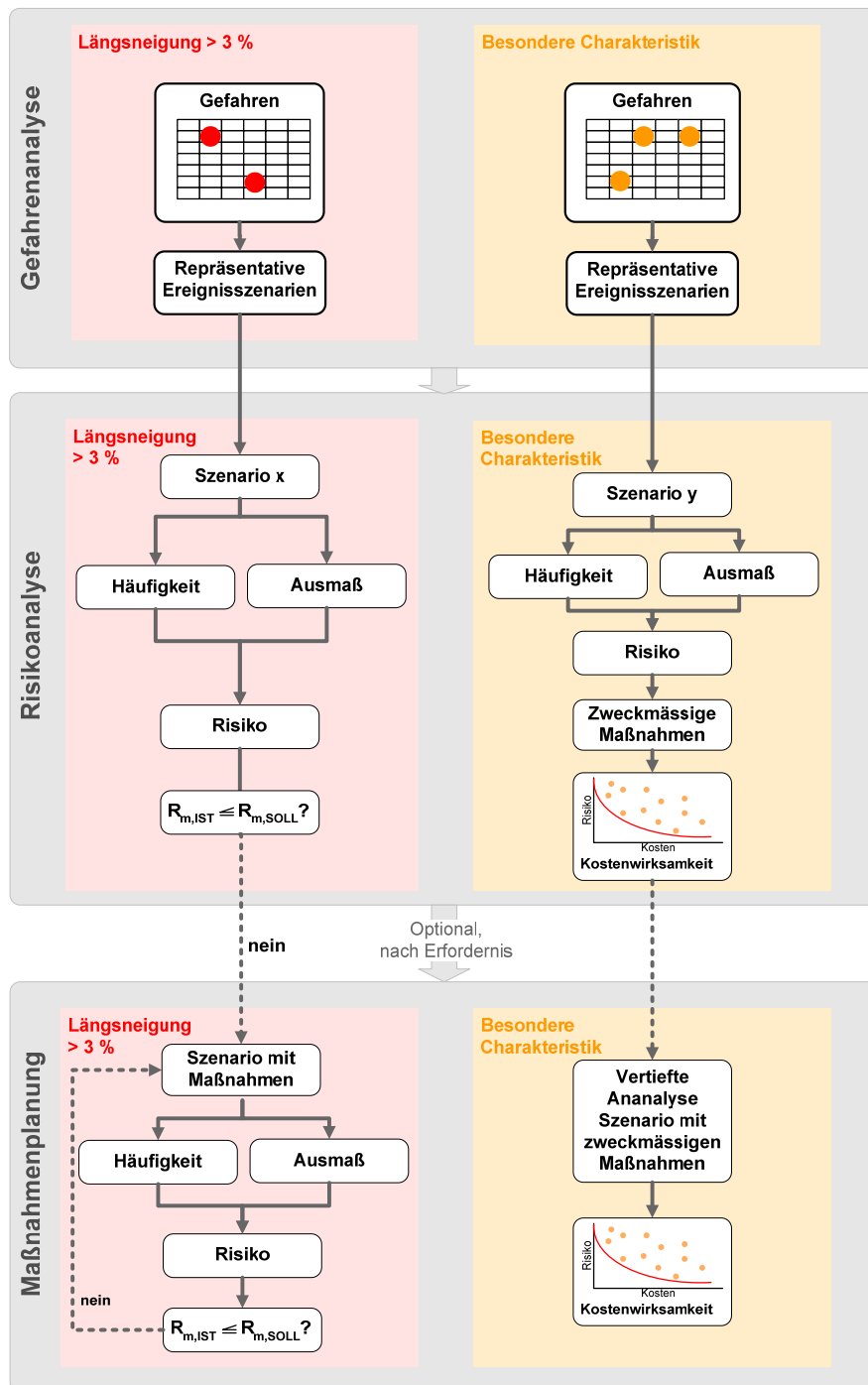


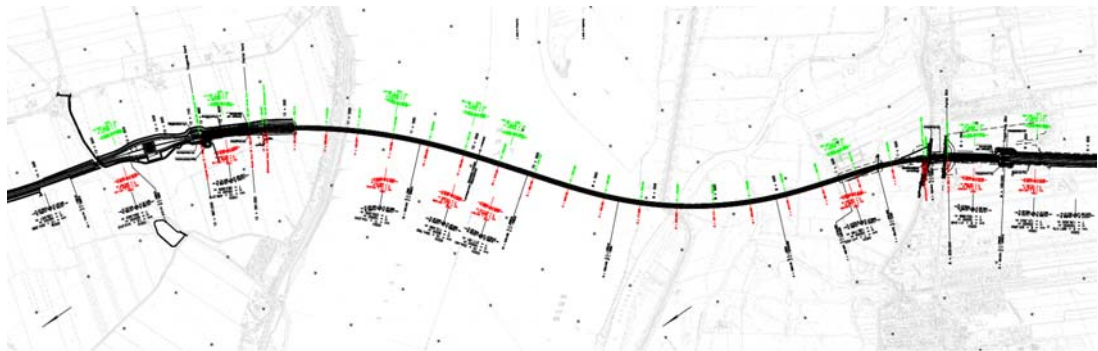
Abbildung 2: Vorgehen Risikoanalyse Elbquerung

1.1 Projektdaten

1.1.1 Lage

Die im Rahmen dieser Risikoanalyse zu untersuchende Tunnelstrecke unterquert die Elbe und verläuft in Süd-West – Nord-Ost Richtung. Sie beginnt im Westen im Bereich auf Höhe der Ritscher Straße und endet im Osten etwa 750 m hinter dem

Elbufer. Der Tunnel weist eine Länge von 5.671 m auf und wird im Richtungsverkehr betrieben. Nachfolgende Abbildung 3 gibt die örtlichen Verhältnisse wieder.

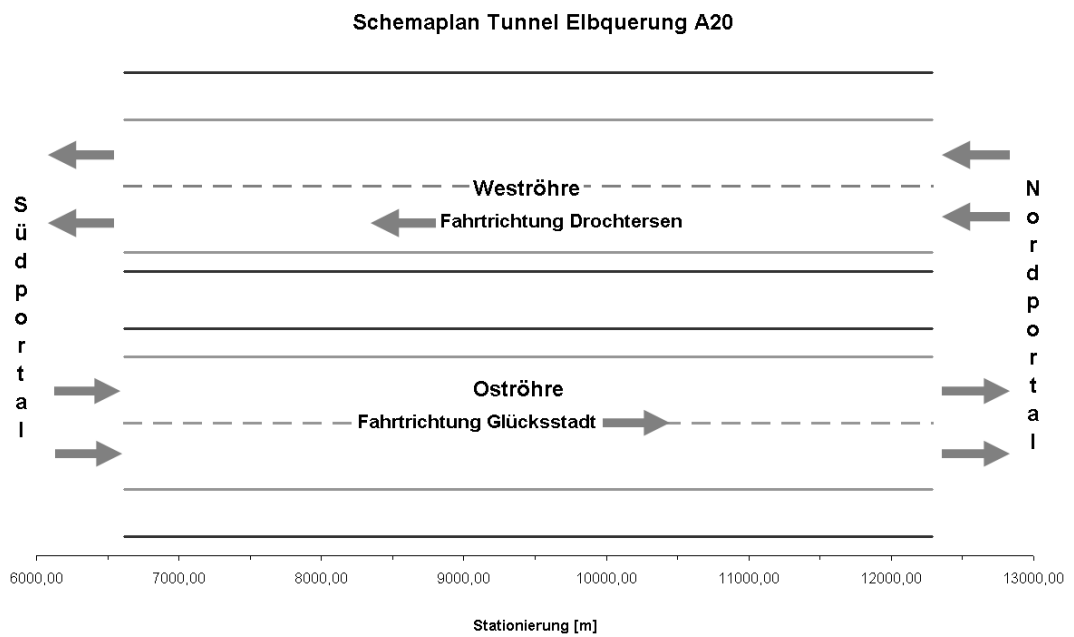


**Abbildung 3: Übersichtslageplan**

**1.1.2 Geometrische Verhältnisse**

Der zu untersuchende Tunnel Elbquerung BAB 20 wird als Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen je Röhre ausgebildet. Der Verlauf ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Als Tunnelquerschnitt ist ein RQ 26Tr nach RABT bzw. RQ 31Tr nach RAA mit einem reduzierten Seitenstreifen von 1,5 m Breite vorgesehen. Abbildung 5 zeigt den gewählten Regelquerschnitt im Bereich eines Querschlags



**Abbildung 4: Schematische Übersicht**



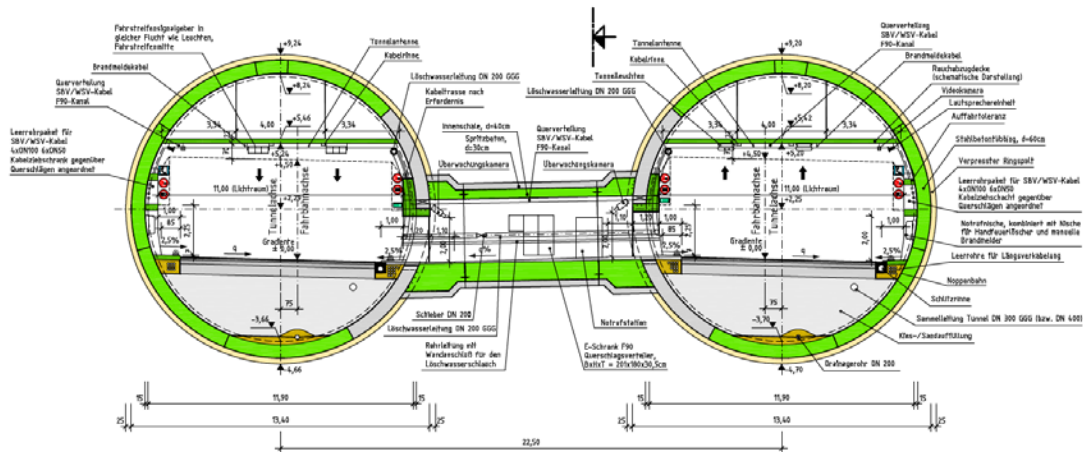


Abbildung 5: Regelquerschnitt RQ 26 Tr nach RABT

Der Verlauf der Gradiente ist durch einen ausgeprägten Tiefpunkt im Bereich der Elbe gekennzeichnet und weist gemäß Bauwerksübersichtsplan EQ-BE-UE-001 in den Rampen Längsneigungen von 2,991 % (Südrampe) und 3,991 % (Nordrampe) mit Längen von 1.334,7 m (Nordrampe) und 1.033,5 m (Südrampe) auf. Nachfolgende Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Fahrbahn- und Deckenhöhen mit den zugehörigen Längsneigungen der Gradiente.

Höhenplan A20 Elbquerung

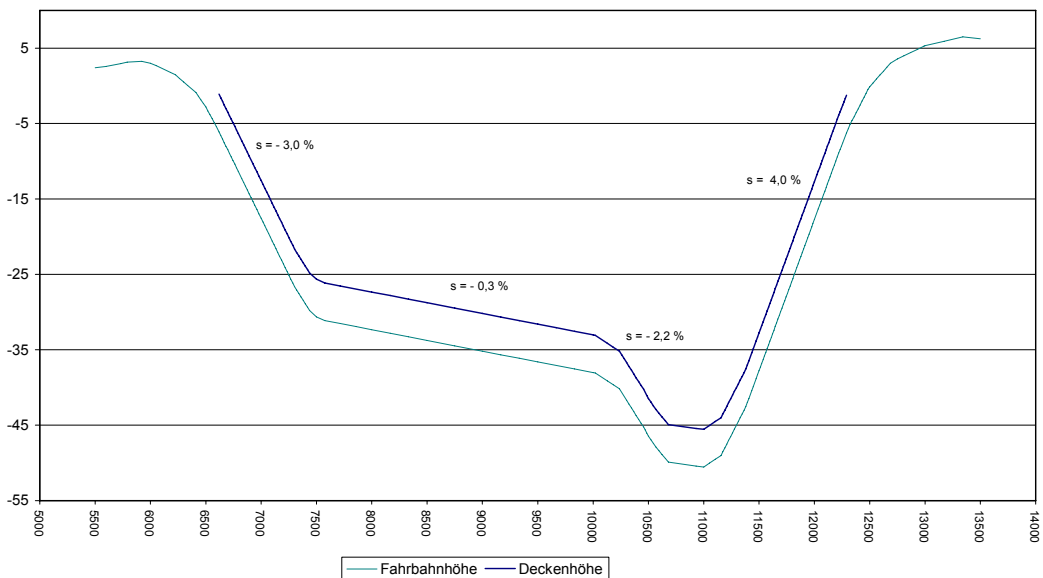


Abbildung 6: Höhenprofile und Längsneigungen der Gradiente

### 1.1.3 Verkehrsaufkommen

Das von der SSP Consult für das Jahr 2025 prognostizierte durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen für den Tunnel Elbquerung beträgt ca. 40.100 Kfz/24 h mit einem Lkw-Anteil von 16,3 %<sup>3</sup> [KOS 2009]. Daraus resultiert eine Lkw-Fahrleistung von ca. 18.534 Lkw-km pro Tag und Tunnelröhre, wodurch sich nach RABT eine Bemessungsbrandleistung von 100 MW ergibt.

Da keine spezifischen Daten zur tageszeitlichen Verteilung des DTV vorliegen, wird nach Rücksprache mit SSP Consult eine Tagesganglinie des Typs C mit geringer Morgen- und Nachmittagsspitze angenommen<sup>4</sup>. Während sich für die morgendliche Spitzenstunde damit 2.882 Kfz/h ergeben, werden in der abendlichen Spitzenstunde bis zu 3.321 Kfz/h erwartet. Die maßgebende Verteilung der Verkehrsbelastungen ist in Abbildung 7 dargestellt.

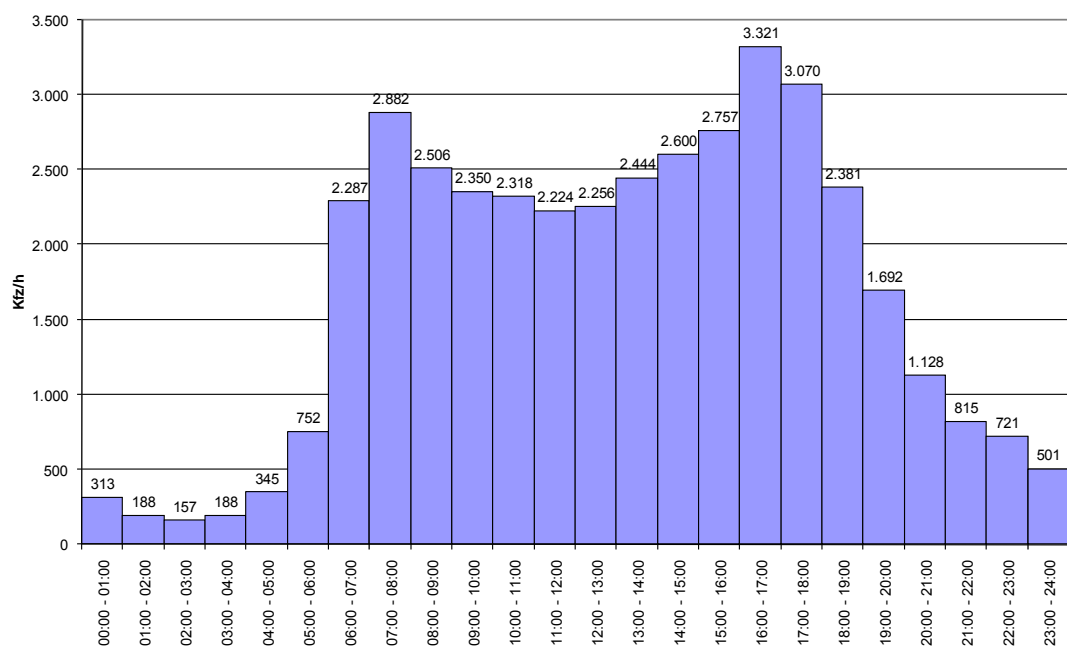


Abbildung 7: Maßgebende Verteilung der Verkehrsbelastungen

<sup>3</sup> Planfall 3 (Gutachten Abbildung 6)

## 1.2 Analysetiefgang

Nach RABT sind Risikoanalysen für Tunnel ab einer Länge von 400 m in folgenden Fällen durchzuführen:

- ▶ Der zu untersuchende Tunnel weist eine besondere Charakteristik auf (vgl. Abschnitt 0.4 RABT).
- ▶ Die baulich-technischen Anforderungen können nicht gemäß RABT für einen Tunnel umgesetzt werden bzw. die Umsetzung ist mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden.
- ▶ Zur Festlegung der Art und Dimensionierung des Lüftungssystems unter Berücksichtigung der Längsneigung (Abschnitte 4.3.2, 4.3.3 und 2.2 der RABT)
- ▶ Zur Überprüfung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten (Abschnitt 9 der RABT).

Der erforderliche Analysetiefgang bestimmt sich über die nach dem „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT“ zu ermittelnden Risikokenngrößen  $K_{\text{Brand}}$  und  $K_{\text{Kollision}}$  mit Hilfe der in nachfolgender Tabelle 1 aufgeführten Bewertungskriterien. K entspricht hierbei den beiden Risikokenngrößen, von denen die jeweils kritischste für die Bewertung maßgebend ist.

	Bewertungskriterien	Analysetiefgang
Besondere Charakteristik	$K > 1$	Quantitative Sicherheitsbewertung
	$1 > K > 0.7$	Qualitative Sicherheitsbewertung
	$K < 0.7$	Keine weiteren Untersuchungen erforderlich
Abweichung zu baulich - technischen Vorgaben der RABT	$100 * (K_{\text{Planfall}} - K_{\text{RABT}}) \geq 3$	Quantitative Sicherheitsbewertung
	$3 > 100 * (K_{\text{Planfall}} - K_{\text{RABT}}) \geq 1.5$	Qualitative Sicherheitsbewertung
	$100 * (K_{\text{Planfall}} - K_{\text{RABT}}) > 1.5$	Keine weiteren Untersuchungen erforderlich
Längslüftung bei Gegenverkehrstunnel und Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr $600 \text{ m} \leq L \leq 1.200 \text{ m}$	$K \geq 1$	Quantitative Sicherheitsbewertung
	$K < 1$	Qualitative Sicherheitsbewertung

**Tabelle 1: Bewertungskriterien zur Bestimmung des Analysetiefgangs**

Für die untersuchte Tunnelstrecke ergeben sich unter Berücksichtigung der geometrischen und verkehrlichen Randbedingungen sowie unter der Annahme einer Rauchabsaugung<sup>5</sup> nachfolgende Risikokennwerte (K-Werte):

Besondere Charakteristik:

$$K_{\text{Kollision}} = 0,968$$

$$K_{\text{Brand}} = 1,226$$

Abweichung zu baulich - technischen Vorgaben der RABT:

$$K_{\text{Kollision}} = 0,0$$

$$K_{\text{Brand}} = 13,6$$

Die resultierenden K-Werte erfordern somit die Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse aufgrund der besonderen Charakteristik sowie der Abweichung zu baulich – technischen Vorgaben der RABT.

Eine Risikoanalyse hinsichtlich der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten (Kategorisierung gemäß ADR) und daraus folgende mögliche Gefahrgutszenarien sind

<sup>5</sup> HBI, 2008:Vorplanung der Tunnellüftung, Kapitel 5.3

nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Die Kategorisierung wird in einer separaten Betrachtung (z. B. zur Inbetriebnahme des Tunnels) durchgeführt.

## **2 Gefahrenanalyse**

Mit der formalen Überprüfung des notwendigen Analysetiefgangs gemäß Leitfaden (s. Abschnitt 1.2) ist die Notwendigkeit für eine quantitative Risikoanalyse identifiziert worden. Zur Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen werden im Rahmen der folgenden Gefahrenanalyse diejenigen Gefährdungen zu identifiziert, die bei den folgenden Risikoanalysen zu berücksichtigen sind.

### **2.1.1 Zielsetzung und Abgrenzung**

Ziel der Gefahrenanalyse ist zu beurteilen, in welchem Umfang weiterführende Risikoanalysen (insbesondere hinsichtlich der besonderen Charakteristiken) durchzuführen sind. Dazu werden mögliche Gefährdungen hinsichtlich der Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden beurteilt, eine Berücksichtigung von Ausfallzeiten, Wegzeiten bei Umfahrung und daraus folgende Kosten sind nicht Teil der Untersuchung.

### **2.1.2 Methodik und Vorgehen**

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

1. In einem ersten Schritt werden die möglichen Gefährdungen, die sich beim Betrieb des Tunnels ergeben zusammengestellt. Dabei werden passive Gefährdungen die sich aus verkehrlichen, technischen, organisatorischen Gefahren bzw. Naturgefahren ergeben und aktive Gefährdungen aus Sachbeschädigungen, Gewalt und politischen Gefährdungen unterschieden. Jeder Gefährdung werden Hauptszenarien zugeordnet, die im weiteren Vorgehen beurteilt werden.
2. Durch einen qualifizierten Ausschluss von solchen Hauptszenarien, die für den betrachteten Tunnel nicht relevant sind oder als Eingangsszenarien ursächlich für andere Hauptszenarien relevant sind, wird die Anzahl der im Weiteren zu untersuchenden Szenarien eingeschränkt. Zur Beurteilung der Rele-

vanz dienen eine grobe Einschätzung von Häufigkeit und Ausmaß von Personen- und Sachschäden und das Vorliegen einer risikorelevanten besonderen Charakteristik für den Tunnel.



3. Hauptszenarien, deren Risiko im Rahmen des qualifizierten Ausschlusses als relevant eingestuft ist, 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 (Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden),
  - Sicherheitsrelevante Aspekte, die in Form von geplanten Maßnahmen einer Begrenzung von Schadenhäufigkeit 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 besonderen Charakteristik des Tunnels das betrachtete Hauptszenario für den Tunnel weiter zu untersuchen ist.
  - Im folgenden Fazit wird dargestellt, ob das Hauptszenario in einer weiterführenden Risikoanalyse auf Grund der besonderen Charakteristik bzw. der Überprüfung von Maßnahmen infolge einer Längsneigung  $\geq 3\%$  untersucht wird.

## 2.2 Gefährdungsmatrix

In der folgenden Gefährdungsmatrix werden die möglichen Gefährdungen zusammengestellt. Dabei wird zwischen passiven und aktiven Gefährdungen unterschieden. Den Gefährdungen sind Hauptszenarien und deren Einstufung Ihrer Relevanz bezüglich einer erforderlichen weiteren Berücksichtigung zugeordnet. Erläuterungen zu einem qualifizierten Ausschluss einzelner Hauptszenarien sind im Anschluss an die Tabelle aufgeführt.

Art der Gefährdung		Hauptszenario	Relevanz
passive Gefährdung	Ereignisse im Tunnel (Verkehr)	Panne	PG_Panne
		Kollision ohne Brand	PG_Kollis
		Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)	PG_Brand
		Freisetzung von Gefahrgütern gemäß ADR	PG_GG-...
		Hindernis (Ladung/Fußgänger/Radfahrer/Tiere etc.)	PG_Hindernis
		Geisterfahrer	a)
	Ereignisse im Tunnel (Technik/Infrastruktur)	Ausfall Lüftung	b)
		Ausfall Beleuchtung	b)
		Ausfall Sicherheitseinrichtung	b)
		Ausfall der Hauptenergieversorgung	b)
	Ereignisse außerhalb des Tunnels (Verkehr)	Stau auf freier Strecke, Rückstau in Tunnel	PG_Stau
		Schiffsanprall / -havarie	c)
		Flugzeugabsturz	d)
	Ereignisse außerhalb des Tunnels (Naturgefahren)	Starkniederschlag (Regen, Schnee, Hagel)	e)
		Luftfeuchtigkeit im Tunnel	f)
		Hochwasser	g)
		Sturm	h)
		Blitzschlag	i)
		Erdbeben	j)
		sonst. Naturgefahren	k)
Organisation / Betrieb / Wartung	Arbeitsunfall	l)	
	kein Regelbetrieb des Tunnels	PG_Betrieb	
	Ausführungsfehler	m)	
	Bedien- und Kommunikationsfehler	n)	
	Verfügbarkeit Ereignisdienste	o)	
	Mangelhafte Erhaltung und Betrieb	p)	
aktive Gefährdung	Sachbeschädigung / Gewalt	Brandstiftung	q)
		Sabotage	q)
		Terroranschlag	r)
		Vandalismus	q)
	Delikte gegen Personen	Selbstschädigung/Suizid	s)
		Angriff auf Verkehrsteilnehmer	s)
	Politische Risiken	Arbeitskampf Tunnelpersonal	t)
		Blockade Mautstation	u)
		Blockade Tunnel	u)

Legende

-  keine relevante Gefährdung → keine weitere Untersuchung
-  relevante Gefährdung → weitere Betrachtung in Abschnitt 2.3

### Ausschluss der Risikorelevanz - Erläuterungen zur Gefährdungsmatrix

- b) Geisterfahrer: Die Gefahr eines Geisterfahrers ist grundsätzlich vergleichbar niedrig wie auf der freien Strecke. Infolge eines Unfalls mit dem entgegenkommenden Verkehr ist das Schadenausmaß jedoch u. U. höher, wobei ein Unfall das auslösende Ereignis für Szenarien Kollision (PG\_Kollis) bzw. Brand (PG\_Brand) ist und daher als Ursache in diesen Szenarien weiter betrachtet wird. Eine gesonderte Untersuchung des Szenarios Geisterfahrer ist nicht erforderlich.
- b) Ausfall Betriebstechnik: Die Auslegung der betriebstechnischen Einrichtungen (Lüftung, Beleuchtung, Sicherheitsausstattung, Hauptenergieversorgung etc.) erfolgt so, dass ein hohes Maß an Redundanz und automatischer Überwachung gewährleistet ist. Darüber hinaus wird die Funktion der sicherheitsrelevanten Ausstattungen über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV-Anlage) sichergestellt. Die Funktionsfähigkeit der gesamten Betriebstechnik wird durch regelmäßige Wartungen (z. T. Wartungsverträge) erhalten. In den meisten Fällen führt ein dennoch möglicher Ausfall zu keiner direkten Gefährdung, da die meisten Sicherheitseinrichtungen für einen Ereignisfall vorgesehen sind<sup>6</sup>. Ein Ausfall kann so nur in speziellen Szenarien zu einem erhöhten Ausmaß führen (z. B. Ausfall der Brandlüftung im Brandfall) und ist in den jeweiligen Szenarien zu berücksichtigen. Der gleichzeitige Ausfall der Hauptstromversorgung und der USV-Anlage ist äußerst unwahrscheinlich.
- Hinsichtlich der technischen Ausstattung und einem möglichen Ausfall der wesentlichen Teile liegt für den Tunnel keine besondere Charakteristik vor, eine gesonderte Betrachtung des Ausfalls von Betriebseinrichtungen ist damit nicht erforderlich.
- c) Schiffsanprall / -havarie: Auswirkung durch Schiffsanprall sind wegen des Bauverfahrens und der großen Überdeckung ausgeschlossen. Schiffshavarien führen nicht zu einer Beeinträchtigung des Tunnelbetriebs. Große Rauchentwicklungen durch Schiffsbrände können u. U. zu Verkehrsstörungen auf der freien Strecke infolge Sichtbehinderung führen, die eine Rückstauung in den Tunnel bewirken. Dies entspricht dem Szenario „Stau auf freier Strecke, Rückstau in Tunnel“ (PG\_Stau).

---

<sup>6</sup> Abweichend dazu ist z. B. die Tunnelbeleuchtung mit Adaptions- und Durchfahrtsbeleuchtung zu sehen, deren Ausfall direkt den Verkehr behindert, jedoch unmittelbar daraus keine Schäden resultieren.



- d) Flugzeugabsturz: Die Wahrscheinlichkeit ist wegen der großer Entfernung zum nächsten Flughafen äußerst gering.
- e) Starkniederschlag (Regen, Schnee, Hagel): Eine Überflutung der Tunnel-fahrbahn ist sehr selten. Die Trog-/ Rampenbereiche sind gesondert von dem Tunnel entwässert, so dass die Auffangbecken im Tunneltiefpunkt nicht durch Niederschlagswasser aus den Außenbereichen belastet werden. Der Überflutungsnachweis wurde für einen 50-jährigen Bemessungsniederschlag geführt.
- Neben der Überflutungsgefährdung kann infolge starker Niederschläge und Hagel der aus dem Tunnel fahrende Verkehr behindert werden. Dies führt zu einem Risikopotenzial im Tunnel durch Stau, der zu Unfällen führen kann. Eine besondere Charakteristik ist hierbei nicht vorhanden, die Möglichkeit von Unfällen durch Witterungseinflüsse außerhalb des Tunnels wird im Szenario Kollision (PG\_Kollis) berücksichtigt.
- f) Luftfeuchtigkeit im Tunnel: Unter besonderen Witterungsbedingungen kann es beim Einfahren in den 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 des Tunnels führen können, die in der weitem Folge ein Auslösen der Sichttrübungsmessung bewirken.
- Den beschriebenen seltenen Witterungsbedingungen kann teilweise durch eine gezielte Lüftungssteuerung begegnet werden. Hinsichtlich des Risikos können die Sichtbehinderungen zu Kollisionen führen. Sie werden in dem entsprechenden Szenario (PG\_Kollis) berücksichtigt.
- g) Hochwasser: Bei Hochwasser der Elbe sind grundsätzlich die Gefährdungen Hochwasser mit Überspülung der Deiche, Deichbruch mit Überflutung der Poldergebiete und Auftrieb der Tunnelröhre zu berücksichtigen. Auf Basis der Hochwasserdaten der Sturmflut von 1976 mit weiteren Zuschlägen wurden die genannten Fälle in einem hydraulischen Gutachten zur Abschätzung der Folgen eines Deichbruchs [PAS 2006] abschließend berücksichtigt und Bemessungsgrundlagen für das Bauwerk (z. B. Höhe der Trogwand) formuliert. Eine vorliegende aus den Hochwassergefahren resultierende besondere Charakteristik ist durch entsprechende Maßnahmen hinreichend berücksichtigt.
- h) Sturm: Starke Winde und Sturm sind im Bereich der Elbquerung vergleichsweise häufige Ereignisse. Eine Gefährdung ist dabei auf den Bereich der

freien Strecke und ggf. durch Hindernisse in den Portal- bzw. Rampenbereichen beschränkt. Dies kann zu Stauungen außerhalb des Tunnels und einen Rückstau in den Tunnel hinein führen. Dieses Szenario ist über die Betrachtung von Stau außerhalb des Tunnels (PG\_Stau) bereits berücksichtigt.

- i) Blitzschlag: Durch Blitzschlag besteht im Wesentlichen eine Gefährdung für die technische Ausstattung, die durch Überspannungen Schaden nehmen kann. Entsprechende Vorkehrungen (Blitzableiter, Potenzialausgleich) sind bei dem Tunnel vorgesehen. Sollte dennoch ein Teil der Betriebsausstattung infolge Blitzschlag ausfallen, so ist dies in den entsprechenden speziellen Szenarien zu berücksichtigen (s. auch Anmerkung b) zum Ausfall der Betriebstechnik)
- j) Erdbeben: Die Lage des Tunnels ist außerhalb einer Erdbebenzone gem. DIN 4149. Damit ergibt sich eine äußerst geringe Wahrscheinlichkeit von Auswirkungen eines relevanten Erdbebens, eine Berücksichtigung ist nicht erforderlich.
- k) sonst. Naturgefahren: Durch die topografische Lage des Tunnels und die vorhandene Geologie sind gravitative Naturgefahren (z. B. Hangrutschungen, Setzungen durch unterirdische Hohlräume etc.) ausgeschlossen. Böschungen werden nach den Regeln der Technik ausgeführt. Im Bereich des Tunnels sind darüber hinaus keine hydraulischen Naturgefahren (z. B. Unterspülungen, etc.) zu erwarten.
- l) Arbeitsunfälle: Zur Vermeidung von Arbeitsunfällen sind die allgemeinen Sicherheitsvorschriften und Unfallverhütungsvorschriften anzuwenden. Aus Arbeitsunfällen können mögliche Folgeereignisse resultieren, die in den Szenarien Kollision (PG\_Kollis) und Brand (PG\_Brand) berücksichtigt werden.
- m) Ausführungsfehler: Mängel zeigen sich durch Risse, Undichtigkeiten etc. an. Regelmäßige Bauwerkskontrollen decken entsprechende Warnhinweise auf. Die Konstruktion wird nach dem anerkannten Stand der Technik und dem Regelwerk (z. B. ZTV-ING) ausgeführt, ein schlagartiges Versagen ist damit extrem wenig wahrscheinlich.
- n) Bedien- und Kommunikationsfehler: Bedienfehler können z. B. ein fehlerhafter manueller Eingriff auf der Handbedienebene der Tunnelsteuerung oder eine fehlerhafte Schaltung von Betriebszuständen bei Arbeitsstellen (Fahrstreifensperrung, Gegenverkehr, etc.) sein. Kommunikationsfehler können zwischen den Tunnelnutzern und dem Tunnelpersonal bzw. zwischen den

verschiedenen Diensten auftreten. Diese Fehler können ebenso zu Bedienfehlern führen. Hinsichtlich der aufgeführten Fehler liegt für den Tunnel keine besondere Charakteristik im Vergleich zu anderen Tunneln vor. Die Meldewege und Bedienung des Tunnels werden in den entsprechenden Dokumenten zum Betrieb des Tunnels erstellt (Sicherheitsdokumentation mit Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Handbücher, etc.) und in regelmäßigen Übungen geprobt. Eine gesonderte Betrachtung ist daher hier nicht erforderlich.


- o) Verfügbarkeit der Einsatzdienste: Mögliche Einschränkungen der Verfügbarkeit können Verkehrsbehinderungen oder eine kurzzeitige Verhinderung einzelner freiwilliger Feuerwehrleute sein. Die Anfahrt der Einsatzdienste wird zur Tunnelöffnung detailliert in den Alarm und Gefahrenabwehrplänen sowie in den Feuerwehrplänen beschrieben. Dort sind ebenfalls Möglichkeiten bei Verkehrsbehinderungen auf der Hauptzufahrt beschrieben. Die Gleichzeitigkeit einer eingeschränkten Verfügbarkeit und eines Schadenereignisses ist als selten einzustufen.
- p) Mangelhafte Erhaltung und Betrieb: Das Tunnelbauwerk ist in regelmäßigen Abständen auf Schäden zu überprüfen, so dass Sanierungsmaßnahmen rechtzeitig eingeleitet werden können. Die Betriebstechnik unterliegt zum einen einer automatischen Prüfung aller Objektgruppen durch die zentrale Leittechnik, zum anderen werden die Bauteile regelmäßig durch das Betriebspersonal bzw. über Fachfirmen (Wartungsverträge) gewartet. Eine besondere Charakteristik liegt hinsichtlich der Wartung nicht vor.
- q) Sachbeschädigung: Sachbeschädigungen können Brandstiftung, Sabotage oder Vandalismus und Diebstahl (z. B. Feuerlöscher) beinhalten. Der Tunnel ist mit Videokameras innerhalb und außerhalb in den Tunnelvorfeldern überwacht, die in einer ständig besetzten Zentrale aufgeschaltet sind. Feuerlöscher, Notrufnischen und Notausgänge sind darüber hinaus elektronisch überwacht, so dass ein Öffnen bzw. Entnehmen zu einer Störungsmeldung mit Aufschalten der entsprechenden Videokamera führt. Weiterhin ist durch das erwartete Verkehrsaufkommen stets mit Fahrzeugen im Tunnel zu rechnen, Personen oder auffällige Fahrzeuge können gemeldet werden. Wegen des hohen Grades der Überwachung und der erschwerten Zugänglichkeit wird die Gefährdung aus Sachbeschädigung als sehr gering beurteilt.
- r) Terroranschlag: Die Gefahr, dass der Tunnel im Zuge der BAB A20 ein potenzielles Ziel für Terroranschläge ist, wird als äußerst gering eingeschätzt. Darüber hinaus sind die Möglichkeiten technischer Maßnahmen oder des


Betriebs zur Verhinderung von Terroranschlägen sehr beschränkt. Die technische Ausstattung im Tunnel zur Überwachung ist bereits auf sehr hohem Niveau, so dass unbefugte Personen detektiert werden können. Eine weitere Berücksichtigung einer Terrorgefährdung erfolgt daher nicht.

- s) 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 (z. B. Stirnwand einer Pannenbucht, Portalwand, Querschlag) lenkt. Dies führt folglich zu den Szenarien Kollision (PG\_Kollis) bzw. Brand (PG\_Brand) und wird als Ursache in diesen Szenarien weiter betrachtet.
- t) Arbeitskampf Tunnelpersonal: Die Wahrscheinlichkeit, dass infolge eines Arbeitskampfes des Tunnelpersonals eine Gefährdung der Tunnelnutzer bzw. des Tunnelbauwerks besteht ist annähernd auszuschließen.
- u) Blockade: Eine politisch motivierte Blockade kann grundsätzlich den Tunnel selbst oder die Mautstation bzw. die Freie Strecke im Umfeld des Tunnels betreffen. Hierbei wird z. B. vom Personal (s. Anmerkungen zu. t)) oder von Lkw-Fahrern eine Durchfahrt zur Durchsetzung von Interessen verhindert. Solche Aktionen sind zum einen äußerst selten in Deutschland und führen in Ihrer Wirkung zum Szenario „Stau außerhalb des Tunnels“ (s. PG\_Stau).


### 2.3 Gefahrenanalyse relevanter Szenarien

Zu den im Abschnitt 2.2 als relevant betrachteten Gefährdungen wird in dem folgenden Schritt der Gefahrenanalyse detailliert untersucht, inwiefern eine Relevanz vorliegt, die eine weitergehende Untersuchung erforderlich macht.

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_Panne</b>
<b>2.3.1 Szenario Panne</b>	
<b>Referenzszenario</b> Pkw bleibt mit einem technischen Defekt auf dem vermindert breiten (1,50 m) Seitenstreifen liegen. Eine Behinderung des rechten Fahrstreifens ist vorhanden	
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ verkehrswidrig überholender Lkw bleibt auf der linken Fahrspur liegen, beim Versuch den Standstreifen zu erreichen wird die gesamte Fahrbahn mit Seitenstreifen blockiert. Passieren der Stelle ist nicht möglich.</li> <li>▪ Wegen Wartungsarbeiten ist die betroffene Röhre im Verkehrszustand Gegenverkehr, ein Passieren des Pannenfahrzeugs ist nicht bzw. nur unter Gefährdung des Gegenverkehrs möglich. <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Vollstau einer Richtung bis Abschleppen des Fahrzeugs</li> <li>→ Frontalzusammenstoß (siehe Kollisionsszenario (PG_Kollis))</li> </ul> </li> <li>▪ Technischer Defekt führt zu einem Brand (siehe Brandszenario (PG_Brand))</li> </ul>	
<b>Ursachen und Auslöser</b> Reifenpanne, technischer Defekt an der Elektrik, Kraftstoffmangel etc. führen zum Liegenbleiben des Fahrzeugs. Überhitzung von Motor, Bremsen, Defekt an der Elektrik etc. führen zum Ausfall und zum Brand.	
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine Personenschäden (Brand s. dort)	<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden an Infrastruktur
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsüberwachung durch Schleifen: → Detektion von zählfließendem Verkehr, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion der Störung bzw. zählfließendem Verkehr, ggf. manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Überwachung der Notrufnischen: → Aufschalten des Videobildes, automatische Warnmeldung und Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon: → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ videobasierte Ereignisdetektion: → zeitverkürzte Erkennung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs ohne Staubbildung, ggf. automatisches bzw. nach Bestätigung in Leitzentrale aktiviertes Programm mit Warnmeldung und Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit.</li> <li>▪ Vorkehrungen für die Betriebsart Gegenverkehr: z. B. mobile physische Trennung der Richtungsfahrbahnen zur Verhinderung von Überholmanövern.</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein Pannenszenario ist erfahrungsgemäß bei der vorliegenden Tunnellänge und den langen Steigungsstrecken eine der häufigsten verkehrliche Störungen.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch den vorhandenen Seitenstreifen ist in den meisten Fällen die Beeinträchtigung des nachfolgenden Verkehrs beschränkt, jedoch durch die reduzierte Breite des Seitenstreifens stets vorhanden.</li> <li>▪ Ausweichmanöver und Verzögerungen sind der Regelfall.</li> <li>▪ Pannenfahrzeuge auf dem Überholstreifen führen zu starken Behinderungen.</li> <li>▪ Pannen haben in dem Tunnel ein hohes Eskalationspotenzial (Unfall, Brand), insbesondere im Gegenverkehrsbetrieb.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die geplanten Sicherheitsmaßnahmen dienen der Detektion von Pannenfahrzeugen und der Warnung des nachfolgenden Verkehrs</li> <li>▪ Wegen der Tunnellänge und des hohen Eskalationspotenzials können ggf. weitere Maßnahmen sinnvoll sein.</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_Kollis und PG_Brand berücksichtigt.	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_Kollision</b>
<b>2.3.2 Szenario Kollision ohne Brand</b>	
<p><b>Referenzszenario</b></p> <p>Bei einem Überholvorgang kommt es beim Spurwechsel zu einem Unfall im Längsverkehr (Typ 6) durch seitliches Touchieren eines weiteren Fahrzeugs. Am Unfall sind zwei Pkw beteiligt. Ein Fahrzeug prallt infolge der Kollision an den Anprallschutz der Tunnelwand und zerstört diesen auf eine Länge von 20 m. Es entsteht erheblicher Sachschaden an den Fahrzeugen und dem Anprallschutz, Personenschäden sind nicht zu verzeichnen. Der Unfall führt zu erheblichen Behinderungen des nachfolgenden Verkehrs.</p>	
<p><b>Worst case Szenario</b></p> <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 (Wegen Wartungsarbeiten ist die betroffene Röhre im Verkehrszustand Gegenverkehr oder durch Geisterfahrer)</li> <li>▪ Kollision führt zu einem Brand (siehe Brandszenario (PG_Brand))</li> </ul>	
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Missachtung von Überholverböten (Lkw bzw. bei Gegenverkehr)</li> <li>▪ Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge - s. PG_Panne oder verlorene Ladung)</li> <li>▪ Überhöhe von Lkw</li> <li>▪ Stau infolge von Pannen und außerhalb des Tunnels liegenden Ursachen (z. B. Autobahnspernung, Starkregen, Hagel, etc.)</li> <li>▪ Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern bei besonderen Witterungszuständen</li> <li>▪ Arbeitsunfall bei Wartungsarbeiten</li> <li>▪ Aktives Herbeiführen eines Unfalls in suizidaler Absicht bzw. zur Schädigung Dritter</li> </ul>	
<p><b>Konsequenzen Personenschäden</b></p> <p>Im Regelfall sind nur geringe Personenschäden zu erwarten, bei schweren Kollisionen sind 2-3 Todesopfer und mehr bzw. bis zu 30 verletzte Personen und mehr möglich.</p>	<p><b>Konsequenzen Sachschäden</b></p> <p>Im Regelfall sind geringe bis mittlere Sachschäden an den Fahrzeugen zu erwarten. Bei schweren Kollisionen sind hohe Fahrzeugschäden sowie Schäden an der Tunnelinfrastruktur, insbesondere dem Anprallschutz, zu erwarten. Notrufnischen, Leuchten etc. können beschädigt werden.</p>
<p><b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b></p> <p><u>vorgesehene Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsbeeinflussungsanlage (VBA) mit Wechselverkehrszeichen (WVZ) → Möglichkeit der Warnung von Verkehrsteilnehmern vor Behinderungen, Vermeidung von Folgeunfällen.</li> <li>▪ Von Außenleuchtdichte abhängige Adaptionsbeleuchtung → Gewöhnung der Fahrzeugführer an die geringe Innenleuchtdichte im Tunnel</li> <li>▪ Aktive Leiteinrichtungen → visuelle Führung der Fahrzeugführer, insbesondere bei geringer Verkehrsdichte</li> <li>▪ Höhenkontrolle im Tunnelvorfeld → Vermeidung von zu hohen Fahrzeugen.</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung durch Schleifen: → Detektion von zähfließendem Verkehr, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen durch die Auffahrkollisionen (Folgekollision) reduziert werden können</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion der Störung bzw. zähfließendem Verkehr, ggf. manuelle Schaltung von Warnhinweisen durch die Auffahrkollisionen (Folgekollision) reduziert werden können</li> <li>▪ Überwachung der Notrufnischen: → Aufschalten des Videobildes, automatische Warnmeldung und Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit durch die Auffahrkollisionen (Folgekollision) reduziert werden können</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon: → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung von Warnhinweisen durch die Auffahrkollisionen (Folgekollision) reduziert werden können</li> <li>▪ Sicherstellung von klimatischen Bedingungen im Tunnel, durch die ein Beschlagen von Scheiben und Visiere vermieden wird</li> </ul> <p><u>mögliche weitere Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lkw-Überholverbot</li> <li>▪ Videobasierte Ereignisdetektion: → zeitverkürzte Erkennung eines liegen gebliebenen Fahrzeugs oder Hindernisses (verlorene Ladung) ohne Staubbildung, ggf. automatisches bzw. nach Bestätigung in Leitzentrale aktiviertes Programm mit Warnmeldung und Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit.</li> <li>▪ Vorkehrungen für die Betriebsart Gegenverkehr: z. B. mobile physische Trennung der Richtungsfahrbahnen zur Verhinderung von Überholmanövern.</li> <li>▪ Geschwindigkeitsüberwachung im Tunnel und den Zulaufstrecken → Reduzierung von Geschwindigkeitsverstößen</li> <li>▪ Abstandskontrollen beim Schwerverkehr → erhöhte Einhaltung von Mindestabständen</li> </ul>	



<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_Kollision</b>
<b>2.3.2 Szenario Kollision ohne Brand</b>	
<p><b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b></p> <p><u>Abschätzung der Häufigkeit</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kollisionen ohne Personenschäden sind in Tunneln im Vergleich zu anderen Schadenereignisse relativ häufig, auch wenn die Unfallrate gegenüber der freien Strecke geringer ist.</li> <li>▪ Infolge der vorliegenden Tunnellänge und den langen Gefälle- bzw. Steigungsstrecken ist eine überdurchschnittliche Unfallrate zu erwarten.</li> </ul> <p><u>Abschätzung der Relevanz:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die langen Gefällestrecken lassen erwarten, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit häufiger überschritten wird. Dadurch ist eine erhöhte Unfallschwere möglich.</li> <li>▪ Die langen Steigungsstrecken führen zu einem verlangsamten Schwerverkehr und damit zu einer Differenzgeschwindigkeit zwischen Pkw und Lkw. Dies kann vermehrt zu Auffahrunfällen bzw. Unfällen durch ausweichende Fahrzeuge führen. Eine Beteiligung von Lkw führt zu einem erhöhten Schadenausmaß.</li> <li>▪ Pannenfahrzeuge beeinträchtigen i. d. R. den nachfolgenden Verkehr in geringem Maß, wodurch sich jedoch Staus und damit ein erhöhtes Unfallpotenzial ergeben.</li> <li>▪ Schäden an der Infrastruktur des Tunnels (insbesondere Aufprallschutz) führen zu Sperrzeiten und Folgekosten. Es ist davon auszugehen, dass der Anprallschutz in einer Vielzahl der Unfälle beschädigt wird. Reparaturarbeiten führen zu weiterem Gefährdungspotenzial durch bauzeitliche Verkehrsführungen.</li> <li>▪ Eine Minimierung der Unfallhäufigkeit sollte wegen der besonderen Charakteristik (Tunnellänge, Steigungsstrecken, Erreichbarkeit durch Einsatzkräfte) bei der weiteren Planung berücksichtigt werden.</li> </ul> <p><u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die gemäß RABT vorgesehenen Sicherheitsmaßnahmen (VBA, WVZ, Adaption Beleuchtung, aktive Leiteinrichtung, Höhenkontrolle, etc.) sind wirksame Maßnahmen zur Gewährleistung eines gleichmäßigen und sicheren Verkehrsflusses. Zu hohe Fahrzeuge können wirkungsvoll vor den Tunnelportalen gestoppt werden.</li> <li>▪ Maßnahmen zur Erkennung von Hindernissen und weiteren Reduzierung der Unfallhäufigkeit und Unfallschwere sollten wegen der besonderen Charakteristik (Tunnellänge, Steigungsstrecken) überprüft werden.</li> </ul>	
<p><b>Fazit</b></p> <p>Eine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Kollision wird durchgeführt.</p>	

Gefahrenbereich: passive Gefährdung	PG_Brand
<b>2.3.3 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 in der Elektrik. Der Fahrzeugführer kann das Fahrzeug auf dem 1,50 m breiten Seitenstreifen 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 wegen der starken Sichtbehinderung. Es kommt zu keinen Personenschäden. Die technische Infrastruktur wird im Bereich des Brandherde 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 teils giftige Rauchentwicklung, Stau in der gesamten Tunnelröhre, Übertragung des Brandes auf mehrere Lkw, Pkw und Busse infolge der dicht zusammenstehenden Fahrzeuge. Hoher Sachschaden, hoher Personenschaden. Schäden am Tunnelbauwerk</li> </ul>	
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Technische Defekte an Fahrzeug, Motor, Elektrik</li> <li>▪ Überhitzung von Bremsen (z. B. bei Gefällestrecken und technischem Defekt)</li> <li>▪ Entzündung von Ladungen</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Überholverböten (Lkw bzw. bei Gegenverkehr)</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge - s. PG_Panne 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>▪ Brand infolge von Wartungsarbeiten bei gesperrter oder teilgesperrter Tunnelröhre</li> <li>▪ Explosion von Gasflaschen bei Wartungsarbeiten</li> </ul>	
<p><b>Konsequenzen Personenschäden</b></p> <p>Bei kleinen Bränden sind geringe Personenschäden zu erwarten bei Bränden mit starker Rauchausbreitung oder Brand mehrerer Fahrzeug hohe Opferzahlen (bis zu ca. 30...50 Todesopfer und mehr sowie bis zu mehreren Dutzend Verletzte), insbesondere bei Vollstau im Tunnel. Bei Unfällen starke Gefährdung von Personen, die nicht in das Unfallgeschehen involviert sind.</p>	<p><b>Konsequenzen Sachschäden</b></p> <p>Im Regelfall hoher Sachschäden an den Fahrzeugen und mittlerer Sachschaden an den technischen Einbauten. Bei großen Bränden große Sachschäden an Fahrzeugen und dem Tunnel. Mehrmonatige Sanierungsarbeiten sind zu erwarten.</p>




Gefahrenbereich: passive Gefährdung	PG_Brand
<h3>2.3.3 Szenario Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)</h3>	
<p><b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b></p> <p><u>vorgesehene Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Brandmeldekabel → Detektion von Bränden innerhalb von 60 Sekunden</li> <li>▪ Sichttrübungsmessung, CO-Wert-Erfassung → Nutzung zur Detektion von Bränden innerhalb von 60 Sekunden</li> <li>▪ automatisch aktiviertes Brandprogramm mit Alarmierung der Einsatzdienste, Sperrung des Tunnels, Aktivierung der Brandlüftung, Schaltung der Tunnelbeleuchtung, Aktivierung der Orientierungsbeleuchtung.</li> <li>▪ Brandlüftung mit Rauchabzugkanal, Bemessung auf 100 MW Brandleistung → Absaugung der Rauchgase im Bereich der Brandstelle, Verhinderung bzw. Verminderung der Rauchgasbelastung in entfernten Bereichen zur Selbstrettung</li> <li>▪ Tunnelsperrung → Verhinderung des Einfahrens weiterer Fahrzeuge in den Tunnel (beide Röhren) zur Begrenzung der Anzahl von Personen in der betroffenen Röhre und Erreichbarkeit für die Einsatzdienste über die freie Röhre.</li> <li>▪ Orientierungsbeleuchtung → Möglichkeit der Orientierung für flüchtende Personen in verrauchten Abschnitten durch helle Lichtpunkte</li> <li>▪ Heraufsetzung des Leuchtdichteniveaus durch Tunnelbeleuchtung → bessere Orientierung im Tunnel</li> <li>▪ Im Brandfall beidseitig schaltbare aktive Leiteinrichtungen → Orientierungsmöglichkeit im verrauchten Raum</li> <li>▪ Fluchtwegkennzeichnung und Kennzeichnung der Notausgänge → Wegweisung zum nächsten Notausgang (sicherer Bereich)</li> <li>▪ Notrufnischen mit Feuerlöscher → Notrufmeldung und Möglichkeit der Bekämpfung von kleinen Bränden</li> <li>▪ Mobilfunkantenne im Tunnel → Möglichkeit der Notrufmeldung über Mobilfunk</li> <li>▪ Notausgänge: Regelabstand ca. 290 m, in Steigungsbereichen Verkürzung bis auf ca. 260 m → Fluchtmöglichkeit für Tunnelnutzer in sichere Bereiche. Verkürzung des nach Richtlinie geforderten Fluchtwegabstands zur Kompensation der größeren Längsneigung</li> <li>▪ Lautsprecherdurchsagen → Fluchtaufforderung für Tunnelnutzer</li> <li>▪ Einsprechmöglichkeit für Verkehrsfunk → Fluchtaufforderung für Tunnelnutzer</li> <li>▪ Freiwillige Feuerwehren auf beiden Portalseiten, Eintreffzeiten (gem. [SCH 2008], Kap.7) der ersten Einsatzkräfte an den Portalen nach ca. 7,5 Minuten (Südseite) und 14,5 - 18,5 Minuten auf der Nordseite. → Fremdrettung und Brandbekämpfung</li> <li>▪ Löschwasserversorgung im Tunnel (über 72 m³ Löschwasserbehälter am Südportal) → Brandbekämpfung durch Einsatzdienste</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion der Störung ggf. vor Brandmeldung mit anschließender manueller Schaltung des Brandprogramms</li> <li>▪ Überwachung der Notrufnischen: → Aufschalten des Videobildes, automatische Warnmeldung und Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit durch die Auffahrkollisionen (Folgekollision) reduziert werden können</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon: → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung v des Brandprogramms</li> <li>▪ Brandschutz der Tübbinge (Anrallschutz, Brandschutzplatten, Zwischendecke) → Schutz des Bauwerks vor dauerhaften Schäden bzw. Einschränkung der Standsicherheit infolge Brandeinwirkung</li> </ul> <p><u>mögliche weitere Maßnahmen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Installation einer Werkfeuerwehr an den Portalen → Verkürzung der Eintreffzeit</li> <li>▪ Verbesserung der technischen und personellen Ausstattung der vorhandenen freiwilligen Feuerwehren → Erhöhung der Effizienz bei der Fremdrettung</li> <li>▪ Automatische Brandbekämpfungsanlagen → Senkung der Brandlast, Brandverzögerung</li> <li>▪ Videobasierte Ereignisdetektion: → zeitverkürzte Erkennung einer Störung, u. U. schon vor Ausbruch eines Brandes, ggf. automatisches bzw. nach Bestätigung in Leitzentrale aktiviertes Brandprogramm.</li> <li>▪ Verdichtung der Notausgangabstände → effizientere Nutzung der Selbstrettungsphase</li> <li>▪ alle Maßnahmen zur Reduktion von Unfallhäufigkeiten (s. Szenario Unfall (PG_Kollis))</li> <li>▪ etc.</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>▪ Durch die vorliegende besondere Charakteristik ist davon auszugehen, dass die absolute Anzahl der Brände infolge der großen Tunnellänge im Vergleich zu anderen Tunneln höher ist und dass infolge der langen Steigungen mit einem erhöhten Unfallrisiko ebenfalls ein vergleichsweise erhöhtes Brandaufkommen möglich ist.</li> </ul> <p><u>Abschätzung der Relevanz:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Das erhöhte Unfallrisiko führt zu einer steigenden Brandgefahr.</li> <li>▪ Die durch die Tunnellänge bestimmte hohe Anzahl von Lkw im Tunnel erhöht die Gefahr von Brandüberschlägen in den räumlich beengten Verhältnissen im Tunnel und damit die Erhöhung der Brandlast.</li> <li>▪ Aus den langen Steigungstrecken ergeben sich zusätzliche Gefahren hinsichtlich Häufigkeit (s. o.) und Ausmaß eines Brandes.</li> <li>▪ Schäden an dem Bauwerk können die Dauerhaftigkeit bzw. Standfestigkeit des Unterwassertunnels erheblich gefährden.</li> <li>▪ Ein eventueller Ausfall der Lüftung und anderer Sicherheitseinrichtungen im Ereignisfall führt infolge der Tunnellänge zu besonders hohen Schadenausmaßen</li> <li>▪ Im Gegenverkehrsbetrieb wird sich ein Stau beiderseits der Brandstelle bilden. Die Zugänglichkeit für Einsatzdienste über die in Wartung/Bau befindliche Röhre ist ggf. eingeschränkt. Ein Erhöhtes Ausmaß ist zu erwarten.</li> </ul> <p><u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die gemäß RABT vorgesehene Sicherheitsmaßnahmen (s. o.) sind wirksame Maßnahmen zur Sicherstellung der Selbstrettungsphase bei Bränden.</li> <li>▪ Wegen der besonderen Charakteristik sollten weitere Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und Kosten beurteilt werden.</li> </ul>	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_Brand</b>
<b>2.3.3 Szenario Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)</b>	
<b>Fazit</b> Eine weiterführende Risikoanalyse zum Szenarios Brand unter Berücksichtigung der besonderen Charakteristik wird vorgenommen. Eine weitere Risikoanalyse zur Überprüfung von Maßnahmen infolge einer Längsneigung $\geq 3\%$ wird gesondert in einer quantitativen Untersuchung durchgeführt.	


<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_GG-Expl</b>
<b>2.3.4 Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Explosion</b>	
<p><b>Referenzszenario</b> Nach einem Unfall gerät ein mit 100 kg TNT beladenes Fahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird</p>	 
<p><b>Worst case Szenario</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung eines Propantransports, Blevé</li> <li>▪ Explosion einer großen Menge TNT o. ä.</li> </ul>	
<p><b>Ursachen und Auslöser</b></p> <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 Brandfolge durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Überholverböten (Lkw bzw. bei Gegenverkehr)</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge - s. PG_Panne oder verlorene Ladung)</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge 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>	
<p><b>Fazit</b> Zur Kategorisierung des Tunnels gemäß ADR erfolgt eine separate Analyse (s. Abschnitt 1.2)</p>	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_GG-Brand</b>
<b>2.3.5 Szenario Beteiligung von Gefahrgütern gemäß ADR - Brand</b>	
<b>Referenzszenario</b> Nach einem Unfall mit einem Tankfahrzeug versagen alle Behälterkammern und ca. 10 m <sup>3</sup> Benzin werden freigesetzt. Es bildet sich eine Benzinlache, die sich zeitverzögert entzündet	
<b>Worst case Szenario</b> <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 Freistrahbrand.</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 Brandfolge durch Unaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Überholverböten (Lkw bzw. bei Gegenverkehr)</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Missachtung von Mindestabständen, Lenk- und Ruhezeiten</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge - s. PG_Panne oder verlorene Ladung)</li> <li>▪ Kollision mit Brandfolge durch Beschlagen von Windschutzscheiben und Helmvisieren bei Motorradfahrern bei besonderen Witterungszuständen</li> <li>▪ Brand von Tankfahrzeugen infolge von Wartungsarbeiten (Betankung von Maschinen) bei gesperrter oder teilgesperrter Tunnelröhre</li> </ul>	
<b>Fazit</b> Zur Kategorisierung des Tunnels gemäß ADR erfolgt eine separate Analyse (s. Abschnitt 1.2)	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>	<b>PG_GG-Tox</b>
<b>2.3.6 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 und bewegt sich zum Tunneltiefpunkt.</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</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 Hindernisse (z. B. Pannenfahrzeuge - s. PG_Panne 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>Fazit</b></p> <p>Zur Kategorisierung des Tunnels gemäß ADR erfolgt eine separate Analyse (s. Abschnitt 1.2)</p>	

Gefahrenbereich: passive Gefährdung	PG_Hindernis
<b>2.3.7 Szenario Hindernis</b>	
<b>Referenzszenario</b> Ein Lkw verliert während der Fahrt einen Teil der Ladung, der den nachfolgenden Verkehr behindert.	
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personen laufen im Tunnel auf der Fahrbahn</li> <li>▪ entlaufene Tiere befinden sich im Tunnel</li> <li>▪ Fahrradfahrer nutzen den Tunnel</li> <li>▪ Das Hindernis führt zu einem Unfall (siehe Kollisionsszenario (PG_Kollis))</li> </ul>	
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ nicht sachgemäße Sicherung von Ladung</li> <li>▪ Personen verlassen das Fahrzeug bei einer Panne bzw. nach einem Unfall</li> <li>▪ Wildtiere kommen über die Portale in das Innere des Tunnels</li> <li>▪ Unbefugtes Betreten/Befahren durch Personen bzw. Radfahrer von außerhalb des Tunnels</li> </ul>	
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine, im Falle eines Unfalls sind Personenschäden möglich	<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine, im Falle eines Unfalls sind Sachschäden möglich
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion der Störung bzw. zählfließendem Verkehr, ggf. manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Überwachung der Notrufnischen: → Aufschalten des Videobildes, automatische Warnmeldung und Herabsetzen der zulässigen Geschwindigkeit</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon: → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Wildzäune außerhalb des Tunnels</li> <li>▪ Beschilderung außerhalb des Tunnels gegen unbefugte Benutzung</li> <li>▪ Sicherung von Betriebszufahrten</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ videobasierte Ereignisdetektion: → zeitverkürzte Erkennung von Hindernissen ohne Staubildung, ggf. automatisches bzw. nach Bestätigung in Leitzentrale aktiviertes Programm mit Warnmeldung und Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit.</li> <li>▪ etc.</li> </ul>	
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hindernisse in Form von verlorener Ladung oder Personen nach einer Panne/Unfall führen häufig zu verkehrlichen Störungen auf Autobahnen.</li> <li>▪ Wildtiere sind bei vorhandenen Wildzäunen sehr selten auf Autobahnen.</li> <li>▪ Eine Nutzung des Tunnels durch unbefugte Verkehrsteilnehmer wird als sehr selten eingeschätzt.</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 (insbesondere im Gegenverkehrsbetrieb). Hinsichtlich der besonderen Charakteristik des Tunnels können sich daraus weitere Szenarien mit hohen Schadensausmaßen ergeben.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die geplanten Sicherheitsmaßnahmen dienen der Detektion von Störungen und der Warnung des nachfolgenden Verkehrs</li> <li>▪ Wegen der Tunnellänge und des hohen Eskalationspotenzials können ggf. weitere Maßnahmen sinnvoll sein.</li> </ul>	
<b>Fazit</b> Keine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Hindernis, 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 PG_Kollis und PG_Brand berücksichtigt.	

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Stau</b>
<b>2.3.8 Szenario Stau auf freier Strecke, Rückstau in den Tunnel</b>		
<b>Referenzszenario</b> In Fahrtrichtung Hamburg kommt es im Bereich einer Mautstation zu Stauungen infolge Überlastung. Das Stauende liegt im Tunnel 1 km vor dem Ausfahrportal im Bereich der Steigungsstrecke (4 %)		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die Richtungsfahrbahn ist im Anschluss an den Tunnel gesperrt, der rückstauende Verkehr ist über Stunden blockiert</li> <li>▪ Infolge der außerhalb des Tunnels liegenden Stauursache kommt es am Stauende zu einer schweren Auffahrkollision (siehe Kollisionsszenario (PG_Kollis)) und ggf. zu einem Brand (siehe Brandszenario (PG_Brand))</li> </ul>		
<b>Ursachen und Auslöser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Überlastung der Mautstation</li> <li>▪ Unfall außerhalb des Tunnels</li> <li>▪ Tunnelsperrung außerhalb des Tunnels</li> <li>▪ Streik von Personal, Lkw-Fahrern</li> </ul>		
<b>Konsequenzen Personenschäden</b> keine Personenschäden (Unfall und Brand s. dort)		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden an Infrastruktur (Unfall und Brand s. dort)
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verkehrsüberwachung durch Schleifen: → Detektion von zähfließendem Verkehr, ggf. automatische Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion der Störung bzw. zähfließendem Verkehr, ggf. manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> <li>▪ Festgelegte Meldekette bei Notruf über Mobiltelefon: → Reaktion der Polizei/Feuerwehr, manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ videobasierte Ereignisdetektion: → zeitverkürzte Erkennung einer Staubildung, ggf. automatisches bzw. nach Bestätigung in Leitzentrale aktiviertes Programm mit Warnmeldung und Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit.</li> <li>▪ Ereignisgesteuertes Programm zur Verhinderung von in den Tunnel einfahrenden Fahrzeugen bei Sperrung/Stau</li> <li>▪ etc.</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Mautstation und dem Tunnel ist ein Rückstau in den Tunnel insbesondere in der Reisezeit nicht ausgeschlossen (keine Angaben im Verkehrsgutachten)</li> <li>▪ Vollsperrungen von Autobahnabschnitten sind relativ selten, dies gilt auch für einen Rückstau bis in den Tunnel.</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stau hat in dem Tunnel ein hohes Eskalationspotenzial (Unfall, Brand), insbesondere im Gegenverkehrsbetrieb.</li> <li>▪ Durch einen möglichen Rückstau von der Mautstation in den Tunnel ist das Unfallrisiko stark erhöht. In Verbindung mit der besonderen Charakteristik Tunnellängsneigung, kann dies zu großen Schadensausmaßen führen.</li> </ul> <u>Einschätzung der Wirkung von geplanten Sicherheitsmaßnahmen:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Die geplanten Sicherheitsmaßnahmen dienen der Detektion von Stau und der Warnung des nachfolgenden Verkehrs</li> <li>▪ Wegen der Tunnellänge und des hohen Eskalationspotenzials können ggf. weitere Maßnahmen sinnvoll sein.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Keine weiterführende Risikoanalyse hinsichtlich des Szenarios Stau auf der freien Strecke, da hierdurch kein Risiko hinsichtlich der Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden zu erwarten ist. Ein Rückstau in den Tunnel als Ursache für Unfälle und Brände werden in den Szenarien PG_Kollis und PG_Brand berücksichtigt.		

<b>Gefahrenbereich: passive Gefährdung</b>		<b>PG_Betrieb</b>
<b>2.3.9 Szenario Betriebsart abweichend von Regelbetrieb</b>		
<b>Referenzszenario</b> Im Zuge von Wartungsarbeiten an der Tunnelbeleuchtung wird eine Arbeitsstelle kürzerer Dauer eingerichtet. Der Überholfahrstreifen der Richtungsfahrbahn Bad Segeberg ist über die erste Tunnelhälfte gesperrt.		
<b>Worst case Szenario</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ eine komplette Röhre ist für außerordentliche Sanierungsarbeiten gesperrt, die freie Röhre wird im Gegenverkehr betrieben</li> <li>▪ Die Arbeitsstellen sind nicht fachgerecht abgesichert</li> <li>▪ Fehlbedienung der Programme zur Steuerung der WVZ</li> <li>▪ Infolge des Gegenverkehrs kommt es zu einem Frontalzusammenstoß (siehe Kollisionsszenario (PG_Kollis))</li> <li>▪ Arbeitsunfall führt zu einem Brand (siehe Brandszenario (PG_Brand))</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 (Unfall, Brand s. dort)		<b>Konsequenzen Sachschäden</b> keine Sachschäden (Unfall, Brand s. dort)
<b>Sicherheitsrelevante Aspekte</b> <u>vorgesehene Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Arbeitsstelleneinrichtung nach Regelwerk</li> <li>▪ VBA mit WVZ zur Verkehrssteuerung</li> <li>▪ Verkehrsüberwachung in ständig besetzter Zentrale: → Detektion einer Störung bzw. zähfließendem Verkehr, ggf. manuelle Schaltung von Warnhinweisen</li> </ul> <u>mögliche weitere Maßnahmen</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorkehrungen für die Betriebsart Gegenverkehr: z. B. mobile physische Trennung der Richtungsfahrbahnen zur Verhinderung von Überholmanövern.</li> <li>▪ etc.</li> </ul>		
<b>Schlussfolgerungen und Beurteilung</b> <u>Abschätzung der Häufigkeit</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wartungsarbeiten etc. führen regelmäßig zu vom Regelbetrieb abweichenden Verkehrsführungen</li> </ul> <u>Abschätzung der Relevanz:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durch den vorhandenen Seitenstreifen ist in den meisten Fällen die Beeinträchtigung des nachfolgenden Verkehrs beschränkt, jedoch durch die reduzierte Breite des Seitenstreifens stets vorhanden.</li> <li>▪ Pannenfahrzeuge führen zu starken Behinderungen.</li> <li>▪ Arbeitsstellen und daraus resultierende Behinderungen haben in dem Tunnel ein hohes Eskalationspotenzial (Unfall, Brand), insbesondere im Gegenverkehrsbetrieb.</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> <li>▪ Wegen der Tunnellänge und des hohen Eskalationspotenzials sind ggf. besondere Maßnahmen hinsichtlich der Absicherung vorzunehmen.</li> </ul>		
<b>Fazit</b> Aus dem Betrieb des Tunnel im Gegenverkehr oder einer eingeschränkten Befahrung der Richtungsfahrbahnen ergibt sich kein erhöhtes Risiko. Unfälle und Brände infolge von Arbeitsstellen und besonderen Verkehrsführungen werden in den entsprechenden Szenarien PG_Kollis und PG_Brand berücksichtigt.		



## 2.4 Ergebnisse der Gefahrenanalyse

Die durchgeführte Gefahrenanalyse ergibt den Bedarf zur weiteren Betrachtung der Hauptszenarien Kollision und Brand. Unterschieden werden dabei die Risikoanalyse, die sich aus der Überprüfung von Maßnahmen infolge einer Längsneigung  $\geq 3\%$  ergeben (4 % Steigung im Nordteil des Tunnels) und die Risikoanalyse bei der mögliche risikomindernde Maßnahmen im Hinblick auf ihre Kostenwirksamkeit untersucht werden.

Die nicht weiter zu betrachtenden Hauptszenarien sind die Szenarien Panne, Hindernis, Stau und Abweichung vom Regelbetrieb des Tunnels. 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.

Hauptszenarien, die eine Freisetzung von Gefahrgütern beinhalten, sind Gegenstand einer eigenen Untersuchung zur Kategorisierung des Tunnels gemäß ADR. (s. Abschnitt 1.2).

### 3 Quantitative Risikoanalyse zur Längsneigung > 3%

#### 3.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die für den Tunnel geplante Gradienten entspricht nicht den Vorgaben der RABT und der RAA. In den RABT wird wegen des höheren Risikos empfohlen, die Längsneigung auf maximal 3 % zu begrenzen (RABT Kap. 2.2). Die RAA begrenzen die maximale Längsneigung ebenfalls auf 3 % (RAA Kap. 8.5.2), empfehlen jedoch für Tunnelabschnitte, die länger als 500 m sind, eine maximale Längsneigung von 2,5 % nicht zu überschreiten. Aufgrund der Abweichung ist eine quantitative Risikoanalyse durchzuführen, bei der das Risiko des geplanten Tunnels (Planfall) mit dem Risiko eines richtlinienkonformen Tunnels (Referenzfall) verglichen wird. Unterscheiden sich die Sicherheitsniveaus zwischen Plan- und Referenzfall signifikant, werden für den geplanten Tunnel weitergehende Maßnahmen und / oder Ausrüstungen erforderlich, die das Risiko auf das des Referenztunnels senken.

#### 3.2 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Untersuchung ist prinzipiell zu unterscheiden zwischen der geplanten Lösung des Tunnels Elbquerung A 20 (Untersuchungstunnel) und einer richtlinienkonformen Lösung (Referenzstunnel), deren Sicherheitsniveaus getrennt ermittelt und vergleichend einander gegenübergestellt werden. Der Referenzstunnel unterscheidet sich vom Untersuchungstunnel dadurch, dass die Gradienten der Nordrampe die in den Richtlinien angegebene zulässige Längsneigung von 3% nicht überschreitet.

Die Bestimmung des jeweiligen Sicherheitsniveaus erfolgt mittels einer quantitativen Risikoanalyse, wodurch sowohl **Schadensausmaße** als auch deren **Eintrittshäufigkeiten** berücksichtigt werden. Als Maß für die Sicherheit dient das Risiko, das aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen resultiert.

##### 3.2.1 Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten

Die Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten erfolgt mit Hilfe von Ereignisbäumen (Event Trees), indem ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Top Event) sämtliche möglichen Ablaufvarianten bis zu einem Endzustand abgebildet werden. Bei den

auslösenden Ereignissen wird im Rahmen dieser Untersuchung prinzipiell zwischen dem Schadensereignis „**Unfall**“ und dem Schadensereignis „**Technischer Defekt**“ unterschieden. Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum erfolgt dann mittels Statistiken bzw. Erfahrungswerten. Durch die Verknüpfung der Eintrittshäufigkeit eines auslösenden Ereignisses mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten kann schließlich die zu erwartende Häufigkeit eines Endzustandes berechnet werden.

Die Bestimmung der **Eintrittshäufigkeit des Schadensereignisses „Unfall“** sowie die Ermittlung der **Eintrittshäufigkeit für das Schadensereignis „Technischer Defekt“** erfolgt mittels fahrleistungsabhängiger Raten auf Basis neuerer Erkenntnisse aus der aktuellen Forschung.<sup>7</sup>

### 3.2.2 Schadensausmaßermittlung

Bei der Ermittlung von Schadensausmaßen zu den jeweiligen Endzuständen ist prinzipiell zwischen Ereignissen mit und ohne Brandfolge zu unterscheiden. Während Schadensausmaße für die häufigeren **Ereignisse ohne Brandfolge** über entsprechende Unfallstatistiken bestimmt werden können, lassen sich die Schadensausmaße für die selteneren **Ereignisse mit Brandfolge** nur mit Hilfe von numerischen Simulationsrechnungen (CFD-Berechnungen) ermitteln. Die Quantifizierung betroffener Personen erfolgt hierbei durch Überlagerung der mittels CFD-Berechnungen bestimmten Einwirkgrößen wie Temperatur und Konzentrationen mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl im Gefahrenbereich.

Zur Durchführung der CFD-Berechnungen werden die Tunnelröhren über ihre gesamte Länge mit ihren Lüftungs- und sicherheitsrelevanten Elementen modelliert. Die numerischen Berechnungen erfolgen in drei Raumdimensionen durch Lösen der zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung. Dadurch lassen sich Aussagen zu den Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum treffen. Der eingesetzte CFD-Code (Fire Dynamics Simulator) 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 konzentrations-

---

<sup>7</sup> FE 03.378/2004/FRB: Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln, Auftraggeber: Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2007

abhängige 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 des Tunnels 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 der Lüftungssteuerungen erfolgt unter Berücksichtigung meteorologischer und Lüftungssystemspezifischer Rand- und Anfangsbedingungen in Abhängigkeit des zugrunde liegenden Lüftungskonzeptes.

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 Verdoppelung der Auflösung durch Halbierung der Gitterweite bedeutet beispielsweise eine achtfach höhere Anzahl an Rechenpunkten und führt dementsprechend 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 beispielsweise Aussagen über die Wirkung einzelner Lüftungssysteme ableiten bzw. verifizieren.

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

Basierend auf den numerischen Berechnungen werden Selbstrettungsbereiche ermittelt. Diese bilden die Grundlage zur Bestimmung der Schadensausmaße in Abhängigkeit des Verkehrszustandes. Detaillierte Ausführungen hinsichtlich der Einwirkgrößen (Temperatur, Schadstoffkonzentrationen) und den Einflussfaktoren (u. a. mittlere Fluchtgeschwindigkeiten, Notausgangsabstände) finden sich in Kapitel 3.8.2.

### 3.2.3 Risikoermittlung

Mit Hilfe von sog. Häufigkeits-Ausmaßdiagrammen (fN-Diagrammen) ist es schließlich möglich, die jeweils ermittelten Sicherheitsniveaus einander vergleichend gegenüberzustellen. Bezugsgröße bildet hierbei der nach RABT ausgestattete Tunnel.

### 3.3 Untersuchungsvarianten

Die zu untersuchenden Varianten unterscheiden sich in mehreren Punkten. Die maximalen Längsneigungen werden für den Referenztunnel auf 3 % begrenzt, während sie im Untersuchungstunnel Beträge von ca. 4 % erreichen. Weiteres Unterscheidungsmerkmal sind die Abstände der Querschläge zwischen den Tunnelröhren.

#### 3.3.1 Referenztunnel (Referenzfall)

Der Referenztunnel entspricht in seiner geometrischen Ausführung sowie in seinen Ausstattungselementen den Vorgaben der RABT. Die Ausbildung des Querschnitts als RQ 26 Tr unterscheidet sich nicht vom Untersuchungstunnel. Es werden die von den RABT geforderten Notausgangsabstände von 300 m angesetzt. Die Längsneigung wird auf maximal 3 % reduziert. Dies betrifft die nördliche Rampe. Hierbei wird der Tiefpunkt des Tunnels als Zwangspunkt festgelegt, was in einer Erhöhung der Gesamtlänge der Referenztunnelröhren resultiert. Die Belüftung des Referenztunnels erfolgt im Normalbetrieb mittels Strahlventilation. Im Brandfall werden die Rauchgase über eine Rauchabsaugung mit einzeln ansteuerbaren Absaugöffnungen aus dem Verkehrsraum extrahiert. Gemäß einer Vorstudie zur Dimensionierung der Lüftung sind für den Referenztunnel in der Weströhre insgesamt 19, in der Oströhre 18 reversible Strahlventilatoren mit einem Schub von mindestens 1.200 N erforderlich<sup>8</sup>. Diese sind entlang der Tunnelstrecke einzeln sowie in den Portalbereichen jeweils einmal paarweise angeordnet. Die Rauchabsaugung erfolgt über einen in den Gewölbequerschnitt, oberhalb des Verkehrsraums installierten Rauchabzugskanal mit Hilfe von einzeln ansteuerbaren Absaugklappen im oberen Wandbereich. Im Falle eines Brandes werden Klappen auf

---

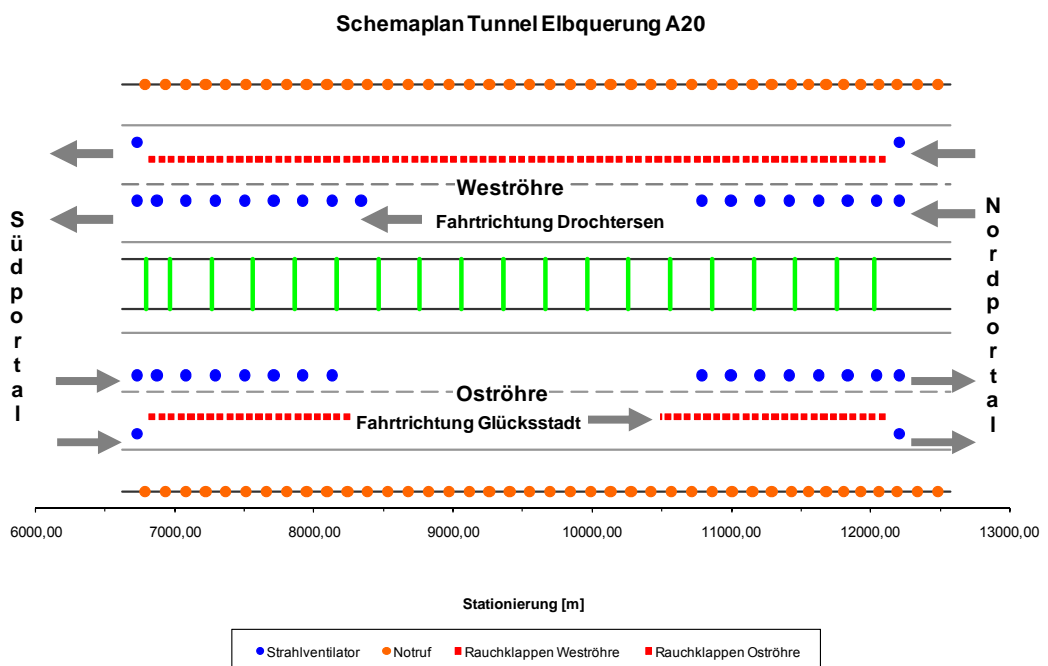
<sup>8</sup> [WEH 2008] Kapitel 6.6 (Tabelle 6.7f)

einer Länge von 280 m geöffnet. Der Abstand der Rauchabsaugklappen beträgt etwa 70 m.

Die Steuerung der Lüftung erfolgt im Normalbetrieb in Abhängigkeit der CO-Konzentration und der vorherrschenden Sichttrübung.

Im Brandfall ist über die Rauchabsaugklappen eine Längslüftungsgeschwindigkeit zu erreichen, die mindestens der kritischen Längsströmungsgeschwindigkeit  $u_{krit}$  entspricht. Nach der Absaugzone sind mindestens 1,5 m/s zu erreichen. Beide Vorgaben stellen sicher, dass die Rauchausbreitung auch bei großen Brandlasten auf den Bereich der Absaugung begrenzt werden kann. Nach erfolgter Detektion muss die erforderliche Lüftungsleistung nach RABT innerhalb einer Minute zur Verfügung stehen. Die Detektion selbst muss ebenfalls innerhalb einer Minute nach Brandausbruch erfolgen. Zeitgleich mit der Detektion erfolgt die Aktivierung weiterer Sicherheitssysteme wie die Sperrung des Tunnels.

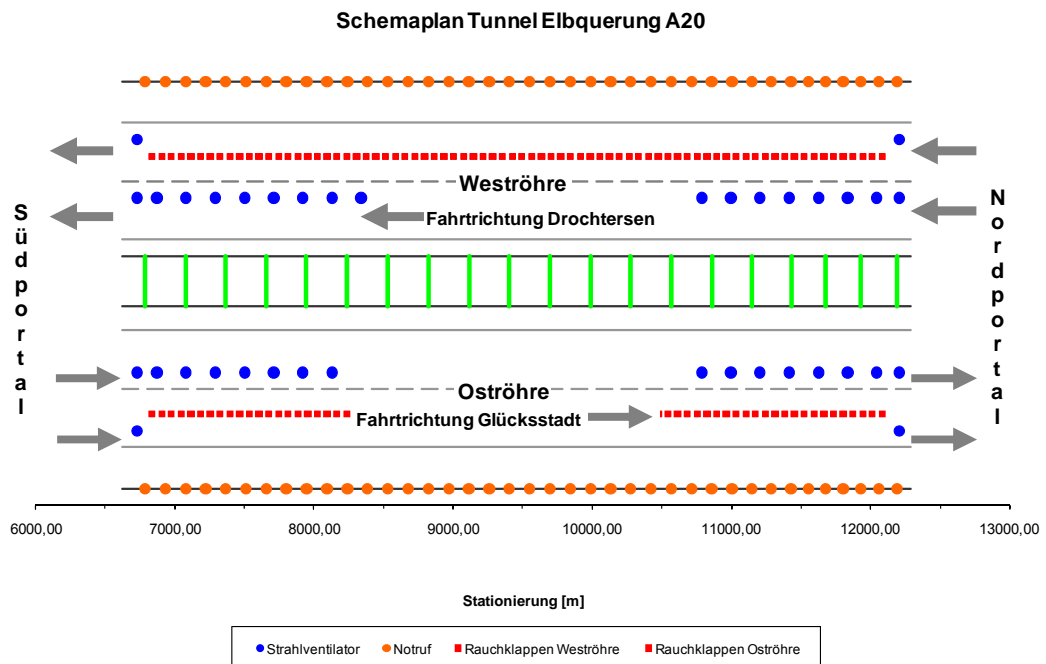
Nachfolgende Abbildung 8 zeigt die Anordnung der maßgeblichen Ausstattungselemente für den Referenz-tunnel nach RABT.



**Abbildung 8: Schemaplan Referenzfall, Notausgangsabstand 300 m**

### 3.3.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Der Untersuchungstunnel (Nullfall) entspricht dem in das Planfeststellungsverfahren eingebrachten Tunnelbauwerk und weist Längsneigungen von bis zu 4 % auf. Der Untersuchungstunnel ist aufgrund dieser Tatsache 287 m kürzer als der Referenzstunnel. Die Notausgangsabstände betragen im Mittel ca. 270 m und sind damit etwa 30 m kürzer, als die des nach RABT ausgestatteten Referenzstunnels. Im Nahbereich des für die Simulationen angenommenen Brandherdes beträgt der Notausgangsabstand 290 m. Alle anderen Parameter sind identisch mit denen des Referenzstunnels. Abbildung 9 zeigt die Anordnung der maßgeblichen Ausstattungselemente für den Untersuchungstunnel.



**Abbildung 9: Schemaplan Untersuchungsfall, Notausgangsabstand ~270 m**

### 3.3.3 Untersuchungstunnel mit verkürzter Detektion (Planfall 1)

Im Planfall 1 erhält der Untersuchungstunnel eine gegenüber dem Nullfall verbesserte Detektion. Diese ermöglicht in Anlehnung an mit verfügbaren Systemen [STE 2005] erzielbaren Reaktionszeiten das Erkennen eines Brandes innerhalb von 15 s. Die erforderliche Lüftungsleistung der Rauchabsaugung steht entsprechend den Vorgaben in den RABT wiederum eine Minute nach erfolgter Detektion

zur Verfügung. Die weitere Modellierung der Tunnelausstattung sowie der Geometrie entspricht dem Nullfall.

### **3.3.4 Untersuchungstunnel mit stationärer Geschwindigkeitsüberwachung (Planfall 2)**

Im Planfall 2 erhält der Untersuchungstunnel gegenüber dem Nullfall zusätzlich eine Geschwindigkeitsüberwachung. Dadurch ist ein höherer Befolgungsgrad für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten und daraus resultierend eine geringere Unfallhäufigkeit zu erwarten. Die Geschwindigkeitsüberwachung wirkt somit reduzierend auf die Eintrittshäufigkeit und hat keine Auswirkungen auf die Ausmaße im Schadensfall. Daher können hier zur Bestimmung der Schadensausmaße die Simulationsergebnisse aus dem Nullfall übernommen werden. Detaillierte Auswertungen hierzu sind in Kapitel 3.7 dargestellt.

## **3.4 Untersuchungsszenarien**

Die zu untersuchenden Szenarien variieren in der Betriebsart, der Brandleistung, dem Zeitraum, dem Verkehrszustand und in der Detektionszeit.

### **3.4.1 Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb**

Die Tunnelröhren werden im Richtungsverkehr betrieben.

### **3.4.2 Brandort**

Das zu erwartende Schadensausmaß kann durch die Lage des Brandortes beeinflusst werden. Als Brandort wird im Rahmen der Untersuchung der Szenarien der Tiefpunkt beider Röhren kurz vor dem Beginn bzw. dem Ende der Nordrampe festgelegt.

### **3.4.3 Brandleistung (5 MW, 30 MW, 100 MW)**

In Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie unterscheiden sich die Brandszenarien gemäß RABT. Für einen Pkw-Brand wird eine Brandleistung von 5 MW angenommen. Einem Bus- oder Lkw-Brand wird eine Brandleistung von 30 MW zugrunde



gelegt. Aufgrund einer zu erwartenden Lkw-Fahrleistung von 18.534 Lkw-km pro Tag und Röhre sind nach RABT auch Brandleistungen von 100 MW zu berücksichtigen. Dies entspricht dem Brand eines Gefahrgut transportierenden Lkw bzw. dem Brand mehrerer Lkw.

#### 3.4.4 Zeitraum (Tag/Nacht)

Einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß hat die Anzahl der potenziell betroffenen Personen im Ereignisfall. Zur Berücksichtigung unterschiedlichen Personenaufkommens werden daher Zeiten mit hohem und mit schwachem Verkehrsaufkommen differenziert betrachtet.

#### 3.4.5 Verkehrszustände (Stau / freier Verkehr)

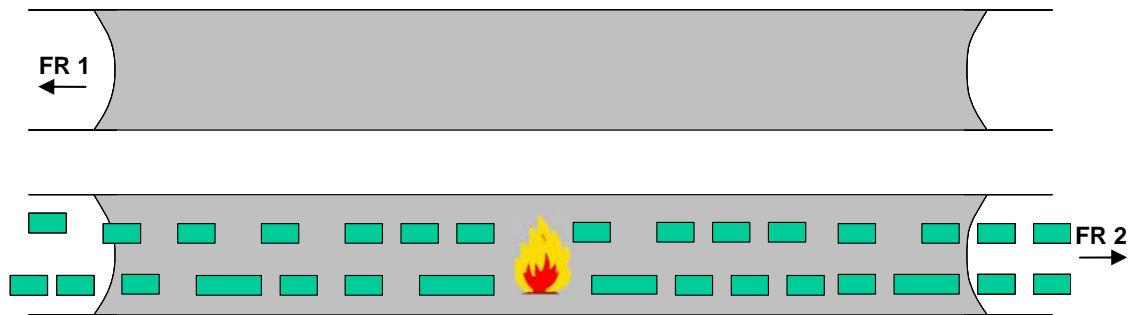
Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Brandereignisses. Aufgrund der potentiellen Gefahr von verkehrlicher Überlast oder durch Rückstaubildung z.B. durch einen Unfall, ist im vorliegenden Fall zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau zu unterscheiden. Im Fall eines Brandereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge sich vor dem Brandherd aufstauen, während die auf der stromabwärtigen Seite befindlichen Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können. In Abbildung 10 ist die sich bei freiem Verkehrsfluss einstellende Stausituation dargestellt.



**Abbildung 10: Stausituation bei freiem Verkehrsfluss**

Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Staus infolge von Überlastung bzw. Störungen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. Hierbei können Tunnelnutzer beidseitig des Brandherdes der Gefahr von Rauch und Tem-

peratur ausgesetzt sein. Abbildung 11 zeigt die Situation bei stockendem Verkehr bzw. Stau.



**Abbildung 11: Stausituation bei stockendem Verkehr bzw. Stau**

### 3.4.6 Detektion

Die Alarmierung der Tunnelnutzer im Brandfall sowie das Aktivieren der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen haben signifikante Auswirkungen auf das jeweilige Schadensausmaß. Im Weiteren wird daher unterschieden zwischen einer erfolgreichen Detektion innerhalb von 60 s bzw. keiner Detektion.

### 3.4.7 Aktivierung des Lüftungssystems

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

### 3.4.8 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.

### 3.4.9 Zusammenfassung der Untersuchungsszenarien

Eine Zusammenfassung der zu untersuchenden Szenarien in tabellarischer Form enthalten nachfolgende Tabellen.

Tabelle 2 enthält getrennt nach Untersuchungsfällen eine Zusammenstellung der im Brandfall maßgeblich den Ereignisablauf und somit das jeweilige Schadensausmaß beeinflussenden Parameter. Ab der Lage des Brandortes bedeutet jede Kategorie eine Verzweigung im Ereignisablauf. Die Anzahl der Verzweigungen und somit die Anzahl der Endzustände (Anzahl Szenarien) ergibt sich dann durch zeilenweise Multiplikation der Entscheidungspunkte je Untersuchungskategorie. Es ergeben sich somit mindestens 2304 Endzustände, für die das jeweilige Schadensausmaß ermittelt werden muss. Die Quantifizierung der Schadensausmaße erfolgt mittels Simulationsrechnungen.

In Tabelle 3 sind die erforderlichen Simulationsrechnungen je Untersuchungsfall aufgeführt. Die hierzu notwendige Anzahl ergibt sich durch zeilenweise Multiplikation der strömungsmechanisch relevanten Entscheidungspunkte je Untersuchungskategorie. Insgesamt sind somit 72 Simulationsrechnungen erforderlich.

Die zur Durchführung der Berechnungen erforderlichen Rechenzeiten sind abhängig von den zur Verfügung stehenden Rechenressourcen. Auf einem Quad-Core PC mit 8 GB RAM beträgt die Dauer eines Simulationslaufes ca. 240 h. Durch das Clustern von mehreren Rechnern zu einem Rechnerverbund und dem parallelen Abarbeiten der Rechenaufgabe lässt sich diese Rechenzeit deutlich verkürzen. Die Durchführung der Berechnungen erfolgt parallel auf jeweils 2 Quad-Core PCs bzw. 4 Dual Core PCs, wodurch sich Rechenzeiten von ca. 120 h je Rechenlauf ergeben. Insgesamt stehen hierfür 8 Quad-Core und 4 Dual Core PCs zur Verfügung, wodurch sich eine Netto-Rechenzeit von 48 Tagen ergibt. Das mit jedem Simulationslauf generierte Datenvolumen beträgt ca. 120,0 GB. Somit ergibt sich für die durchzuführenden Berechnungen ein Gesamtspeicherbedarf von 5,7 Terra-Byte.

Untersuchungsvariante	Lüftungssystem	Anzahl Röhren	Betriebszustand RV	Abstand Notausgänge 300 m / 270 m	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Brandort	Brandleistung 5 MW / 30 MW / 100 MW	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich ≤ 60 s ja / nein	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Anzahl Szenarien / Endzustände
Referenztunnel (Referenzfall) Längsneigung s = 3%	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	768
Untersuchungstunnel (Nullfall) Längsneigung s = 3.991 %	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	768
Untersuchungstunnel mit verbesserter Detektion (Planfall 1)	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	2	1	3	2	2	2	2	2	2	768
													<b>Gesamt</b>	<b>2.304</b>

**Tabelle 2: Maßgebende zu untersuchende Szenarien  
(grün: Referenztunnel, gelb: Untersuchungstunnel)**

Untersuchungsvariante	Lüftungssystem	Anzahl Röhren	Betriebszustand RV	Abstand Notausgänge 300 m / 270 m	Unfall mit Kfz-Brand ja / nein	Brandort	Brandleistung 5 MW / 30 MW / 100 MW	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand Frei / Stau	Detektion erfolgreich ≤ 60 s ja / nein	Tunnel-sperrung ja /nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Anzahl Szenarien / Endzustände
Referenztunnel (Referenzfall) Längsneigung s = 3%	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	1	24
Untersuchungstunnel (Nullfall) Längsneigung s = 3.991 %	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	1	24
Untersuchungstunnel mit verbesserter Detektion (Planfall 1)	Längslüftung mit Absaugklappen	2	1	1	1	1	3	1	2	1	1	2	1	24
													<b>Gesamt</b>	<b>72</b>

**Tabelle 3: Erforderliche CFD Simulationsberechnungen  
(grün: Referenztunnel, gelb: Untersuchungstunnel)**

### 3.5 Modellierung der Lüftungsanlagen

Grundlage für die Modellierung der Tunnellüftung bilden die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Normal- und Brandventilation [WEH 2008]. Die darin getroffenen wesentlichen Festlegungen werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

#### 3.5.1 Bemessungsbrandleistung

Die RABT sehen zur Bestimmung der Energiefreisetzungsraten und den korrespondierenden Rauchgasmengen eine Ermittlung in Abhängigkeit von der zu erwartenden Lkw-Fahrleistung vor. Die Energiefreisetzungsraten variieren zwischen 30 MW und 100 MW. Nach Tabelle 4 sind aufgrund der zu erwartenden Lkw-Fahrleistung von 18.534 Lkw-km pro Tag und Röhre Brandleistungen von 100 MW bei der Bemessung der Lüftungsanlage zugrunde zu legen.

Lkw*km / Tag und Röhre	Energiefreisetzungsrate	Rauchgasmenge
< 4000	30 MW	80 m <sup>3</sup> /s
> 4000	50 MW	120 m <sup>3</sup> /s
> 6000	100 MW	200 m <sup>3</sup> /s

**Tabelle 4: RABT Deutschland**

#### 3.5.2 Anzahl und Anordnung der Rauchklappen

Für die untersuchten Tunnelvarianten wird eine Rauchabsaugung mit einzeln ansteuerbaren Absaugöffnungen modelliert. Ihre Modellierung geschieht anhand der Vorgaben und Empfehlungen des Lüftungsgutachtens von HBI [WEH 2008] Dabei wird die Brandventilation auf eine Mindestabsaugleistung von 300 m<sup>3</sup>/s ausgelegt

Aufgrund der Bauart der Zwischendecke werden die Rauchklappen zweigeteilt vorgesehen. Für jeden Rauchklappenquerschnitt wird als wirksamer Strömungsquerschnitt eine Grundfläche von 2 x 2,5 x 1,6 m<sup>2</sup> angenommen. Zur Begrenzung der Durchströmgeschwindigkeiten der Rauchklappen werden 10 (= 2 x 5) aktive Klappen im Brandfall angesetzt, die bei einem Volumenstrom von je 30 m<sup>3</sup>/s eine maximale Durchströmgeschwindigkeit von weniger als 10 m/s aufweisen. Beim Abstand der Rauchklappen wird von ca. 70 m ausgegangen. Somit ergeben sich für den gesamten Tunnel insgesamt 76 Rauchklappenquerschnitte pro Tunnelröhre.

### 3.6 Numerische Ausbreitungsberechnung / Brandsimulation

Grundlage der Ausmaßermittlung bilden die numerischen Berechnungen zur Brandentwicklung und Rauchausbreitung. Aufgrund der zentralen Bedeutung der Simulationen werden im Folgenden das mathematische Modell, der Algorithmus und die Modellierung der maßgebenden Größen kurz erläutert.

#### 3.6.1 Mathematisches Modell

Grundlage der Berechnungen zur Bestimmung der Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum bilden die nachfolgend aufgeführten zeitabhängigen Erhaltungsgleichungen für Masse-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung.

$$\text{Massenerhaltung} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\text{Stoffhaltung} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{m}_i'''$$

$$\text{Impulserhaltung} \quad \rho \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

$$\text{Energieerhaltung} \quad \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} - \nabla \cdot \mathbf{q}_r + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T + \sum_I \nabla \cdot h_i \rho D_i \nabla Y_i$$

Aufgrund ihrer Komplexität sind diese kontinuierlich formulierten Gleichungen nicht mehr analytisch lösbar und können nur näherungsweise mit Hilfe von numerischen Methoden gelöst werden. Hierzu müssen diese partiellen Differentialgleichungen zunächst diskretisiert werden, d.h., die in Raum und Zeit kontinuierlichen Differentialgleichungen werden nur noch an einer endlichen Anzahl von Punkten im Raum zu bestimmten Zeitpunkten betrachtet.

Die zeitliche und räumliche Diskretisierung erfolgt mit Hilfe der Finiten Differenzen Methode. D.h. der Differentialquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h}$$

wird durch den Differenzenquotient

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u(x+h, y) - u(x, y)}{h}$$

approximiert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt hierbei mit einem expliziten Predictor-Corrector Verfahren 2-ter Ordnung. Die räumlichen Ableitungen werden durch Finite Differenzen zweiter Ordnung approximiert. Das resultierende lineare Gleichungssystem lässt sich dann iterativ lösen.

### 3.6.2 Algorithmus

Der verwendete Algorithmus zählt zu den sog. Druckkorrekturverfahren. Dabei wird ein nicht divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld mit Hilfe des Druckes durch Lösen einer Poissongleichung in ein divergenzfreies Geschwindigkeitsfeld überführt. Im Einzelnen werden folgende Schritte bis zum Erreichen der vorgegebenen physikalischen Endzeit durchlaufen:

1. Festlegung der physikalischen Endzeit der Berechnung  $t_{\text{end}}$
2. Bestimmung der Zeitschrittweite  $\delta t$
3. Berechnung eines nicht divergenzfreien Geschwindigkeitsfeldes  $u^{(n)*}$
4. Iterative Lösung einer Poissongleichung für den Druck  $p^{(n+1)}$  mit Hilfe des nichtdivergenzfreien Geschwindigkeitsfeldes  $u^{(n)*}$
5. Berechnung der Geschwindigkeiten  $u^{(n+1)}$  durch Korrektur des vorläufigen Geschwindigkeitsfeldes mit Hilfe des Druckes  $p^{(n+1)}$
6. Berechnung von  $T^{(n+1)}$ ,  $c^{(n+1)}$ , ...
7. Erhöhung der Zeit  $t$  um die Zeitschrittweite  $\delta t$
8. Wiederholung der Schritte 1-7 bis  $t_{\text{end}}$  erreicht

Die Zeitschrittweite bestimmt sich aus den folgenden nach Courant-Friedrichs-Lewy (1928) benannten Stabilitätsbedingungen

$$\delta t < \frac{\delta x}{|u_{\text{max}}|} \quad \delta t < \frac{\delta y}{|v_{\text{max}}|} \quad \delta t < \frac{\delta z}{|w_{\text{max}}|} .$$

Danach darf sich ein Fluidteilchen innerhalb der Zeitschrittweite  $\delta t$  um nicht mehr als eine Gitterweite  $\delta x$  bewegen.

Der Zeitaufwand zur Durchführung der Simulationsrechnungen resultiert somit aus der Zeitschrittweite  $\delta t$  und den zur Lösung der Poissongleichung benötigten Iterationen. Typischerweise entstehen dadurch für ein Szenario Rechenzeiten im Rechenverbund auf zwei PC mit 8 Rechenkernen von ca. 120 h.

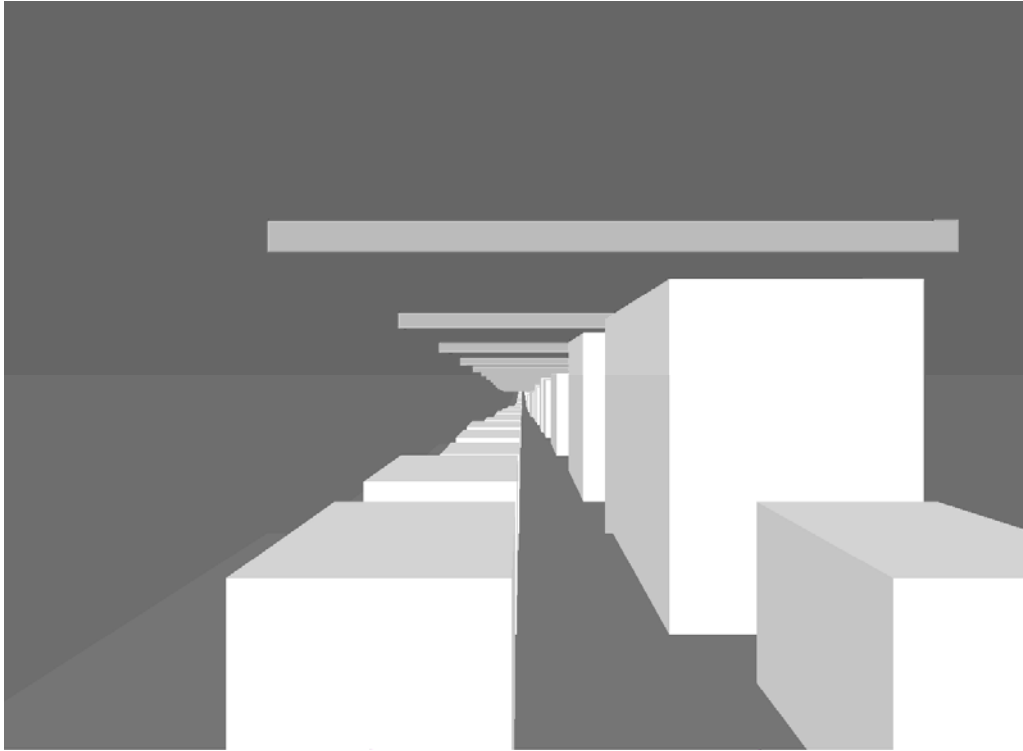
### **3.6.3 Modellierung der Tunnel (Preprocessing)**

Zur möglichst realitätsnahen Abbildung der Tunnel werden diese über ihre gesamte Länge mitsamt ihren sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Ventilatoren, Detektionssystemen und Notausgängen sowie den sich in den Röhren befindlichen Fahrzeugen abgebildet. Hierzu müssen zum einen die geometrischen Angaben in ein Rechengitter übertragen werden und zum anderen Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben werden. Des Weiteren sind Angaben zur Simulationsdauer und zum Aktivieren und Deaktivieren von Ventilatoren erforderlich. Um bei Brandbeginn einen eingeströmten Zustand zu erreichen, werden sämtliche Simulationen eine Minute vor der Zündung des Brandmittels begonnen und über eine Dauer von 6 Minuten durchgeführt.

#### **3.6.3.1 Tunnelgeometrie**

Damit der Tunnel in seiner ganzen Funktion abgebildet werden kann, erfolgt die Modellierung der Tunnelröhre mit mehreren Rechengittern mit unterschiedlicher Auflösung. Im Brandnahbereich wird ein Gitter mit einer Auflösung von 0,5 m je Koordinatenrichtung verwendet. Da sich mit jeder Halbierung der Gitterweite der Rechenaufwand und der Speicherbedarf verachtfacht, stellt dies einen guten Kompromiss zwischen einer wünschenswerten feineren Auflösung und dem Ressourcenbedarf dar. Eine Auflösung von 0,5 m quer zur Längsrichtung ermöglicht außerdem eine realitätsnahe Abbildung der geometrischen Verhältnisse und der betriebstechnischen Einrichtungen sowie des Einflusses durch den Verkehr. In Tunnellängsrichtung erfolgt in den zum Brandherd entfernter gelegenen Bereichen eine Ausdünnung des Rechengitters auf eine Gitterweite von 1,0 m, wodurch eine Halbierung des Rechenaufwandes und des Speicherbedarfs in diesen Bereichen erzielt wird. Nachfolgende Abbildung 12 zeigt beispielhaft die Modellierung der Oströhre im Bereich der letzten Gefällstrecke vor dem Tunneltiefpunkt (ca. Station km 10,300).

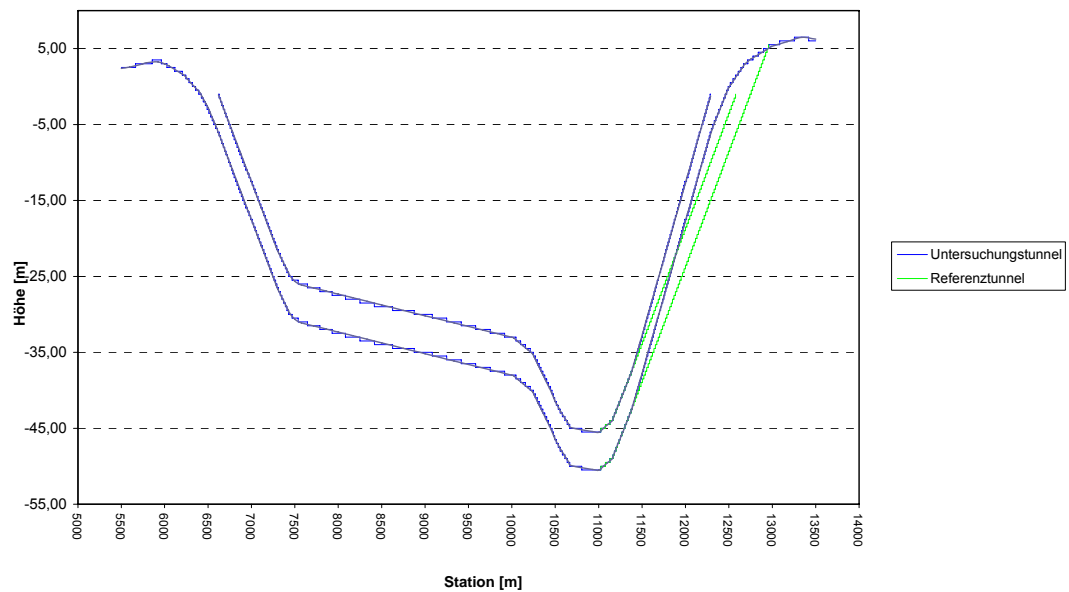




**Abbildung 12: Modellierungsbeispiel**

### **3.6.3.2 Längsneigung**

Zur Berücksichtigung von Kamineffekten infolge thermischen Auftriebs werden die Fahrbahn- und Deckenhöhen für den Untersuchungstunnel ausführungsgetreu nachmodelliert und den numerischen Berechnungen zu Grunde gelegt. Der Referenzstunnel nach RABT wird mit maximalen Längsneigungen von 3 % modelliert. In den nachfolgenden Abbildungen sind die den Berechnungen zugrundeliegenden Modellierungen für den Untersuchungstunnel und den Referenzstunnel dargestellt. Abbildung 13 zeigt die tatsächlichen sowie die modellierten Gradientenverläufe des Tunnels Elbquerung.



**Abbildung 13: Tatsächliche und modellierte Gradienten des Tunnels Elbquerung**

### 3.6.3.3 Ventilation und Rauchabsaugung

Die Abbildung der Ventilatoren erfolgt über einzeln ansteuerbare Ein- und Ausströmränder. Zur Realisierung eines Freistrahls werden auf den Einströmrändern für die Strahlgeschwindigkeit Dirichlet-Bedingungen vorgegeben.

Entsprechend der von HBI durchgeführten Lüftungsdimensionierung werden Strahlventilatoren mit 1120 mm Innendurchmesser verwendet. Die zugehörigen Kenngrößen betragen für den Volumenstrom  $31,4 \text{ m}^3/\text{s}$  sowie für die Ausblasgeschwindigkeit  $31,9 \text{ m/s}$ . In der Modellierung werden diese entsprechend berücksichtigt. Die Aktivierung der im Brandfall notwendigen Ventilatoren erfolgt in Abhängigkeit des zu betrachtenden Szenarios auf Basis des jeweils zugrunde liegenden Lüftungskonzeptes.

Die Rauchabsaugung wird ebenfalls entsprechend der durchgeführten Dimensionierung mit einem Volumenstrom von  $30,0 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Fläche von  $4 \text{ m}^2$  je Rauchklappe modelliert.

### 3.6.3.4 Brandstelle / Brandherd

Der Brandherd wird im Tiefpunkt der Tunnelröhren, auf halber Strecke zwischen zwei Notausgängen angenommen. Zur realitätsnahen Abbildung eines Fahrzeugbrandes müssen die zu erwartende Brandleistung sowie die freigesetzte Rauchmenge bekannt sein. Nachfolgend wird die Modellierung dieser beiden maßgebenden Größen erläutert.

### 3.6.3.5 Brandleistung

Als Brandleistung wird in der Regel die maximale Energiefreisetzungsrate, welche über eine signifikante Zeitdauer auftritt, bezeichnet. Die Energiefreisetzungsrate bestimmt die Rauchgastemperatur und ist die treibende Kraft hinter der Rauchausbreitung. Eine Zusammenstellung der typischerweise während eines Fahrzeugbrandes auftretenden Brandleistungen enthält Tabelle 5.

Kfz	Brandleistung [MW]
Pkw	3-5
Van	5
Transporter	15
Bus / Lkw	30
Lkw, beladen (Gefahrgut)	50 (100)

**Tabelle 5: Reale Energiefreisetzungsraten**

Im Rahmen dieser Untersuchung werden Brandleistungen von 5 MW, 30 MW und 100 MW betrachtet. Abbildung 14 beinhaltet den zeitlichen Verlauf der simulierten Energiefreisetzungsraten.

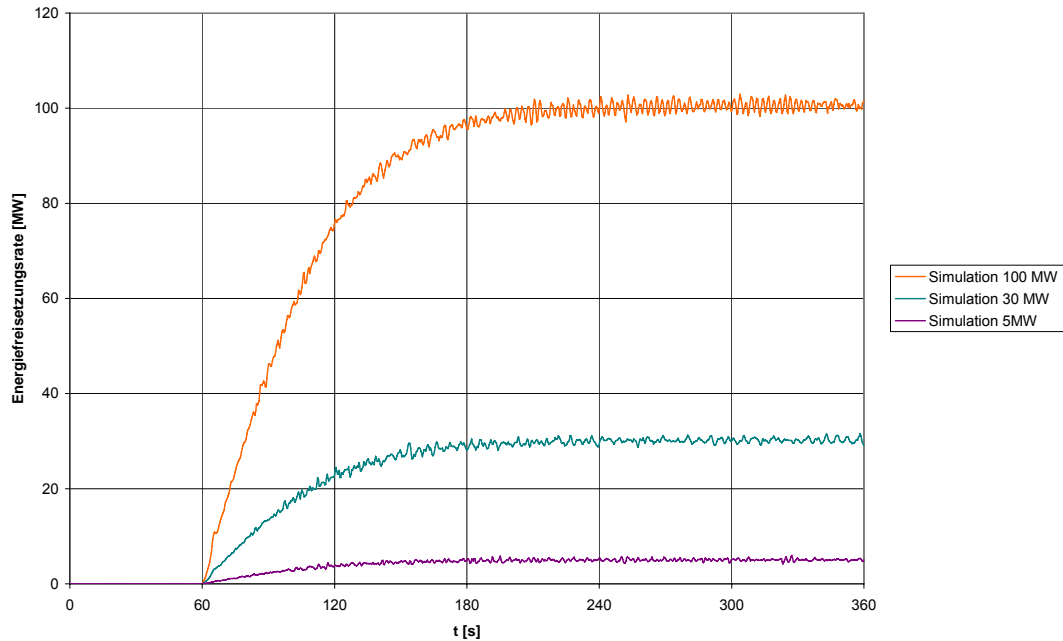


Abbildung 14: Simulierte Energiefreisetzungsraten

### 3.6.3.6 Rauchmenge

Wesentlichen Einfluss auf die sich einstellenden Sichtbedingungen haben die durch einen Brand freigesetzten Rauchpartikel. Für verschiedene Fahrzeuge wurden im Rahmen der EU 499 FIRETUN – Versuche die in Tabelle 6 zusammengestellten Rußentstehungsanteile  $Y_s$  [kg/kg] bezogen auf die jeweilige Brandgutmenge bestimmt. Die hierbei erzielten Rußentstehungsanteile variieren in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps zwischen 0,05 (Bus) und 0,095 (Pkw). Basierend auf diesen Werten wird im weiteren Verlauf der Untersuchung ein Rußentstehungsanteil von 0,1 angenommen.

Fahrzeug	$Y_s$ [kg/kg]
Pkw mit geringem Kunststoffanteil	0,095
Pkw mit hohem Kunststoffanteil	0,08
Reisebus	0,05

Tabelle 6: Rußentstehungsanteile für reale Kfz (Steinert, 1996)

### 3.6.3.7 Simulationsdauer

Aufgrund des hohen Rechenaufwands wird versucht, die erforderliche Simulationsdauer auf das notwendige Maß zu reduzieren. Im Allgemeinen reichen wenige Minuten Simulationszeit aus, um die Ausmaße vollständig zu erfassen.

Die erste Simulationsminute wird genutzt, um einen definierten Zustand zu erhalten. Die vorherrschenden Längsströmungsgeschwindigkeiten im Tunnel, beeinflusst durch die vorherrschenden Windverhältnisse, Ventilationszustände und fahrzeuginduzierten Strömungen können sich somit einstellen.

Nach einer Minute wird dann das Brandereignis aktiviert. Ausgehend von einer Detektionszeit von 60 s gemäß RABT, wird ab der Simulationssekunde 120 das Brandprogramm aktiviert und die Tunnelnutzer werden zur Flucht aufgefordert. Ausgehend von einem durchschnittlichen Notausgangsabstand von 300 m und einer mittleren Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s ist der Selbstrettungsvorgang somit innerhalb von 231 s abgeschlossen. Summiert man die aufgeführten Zeiten auf, so ergibt sich eine notwendige Simulationsdauer von ca. 6 min.

Die Fremdrettung spielt in diesen Überlegungen eine nachrangige Rolle, da davon auszugehen ist, dass für Tunnelnutzer bereits vor Eintreffen der Rettungskräfte im Gefährdungsbereich (d. h. in der Tunnelröhre) ein toxisches Niveau erreicht wird.

### **3.6.4 Simulationsergebnisse (Postprocessing)**

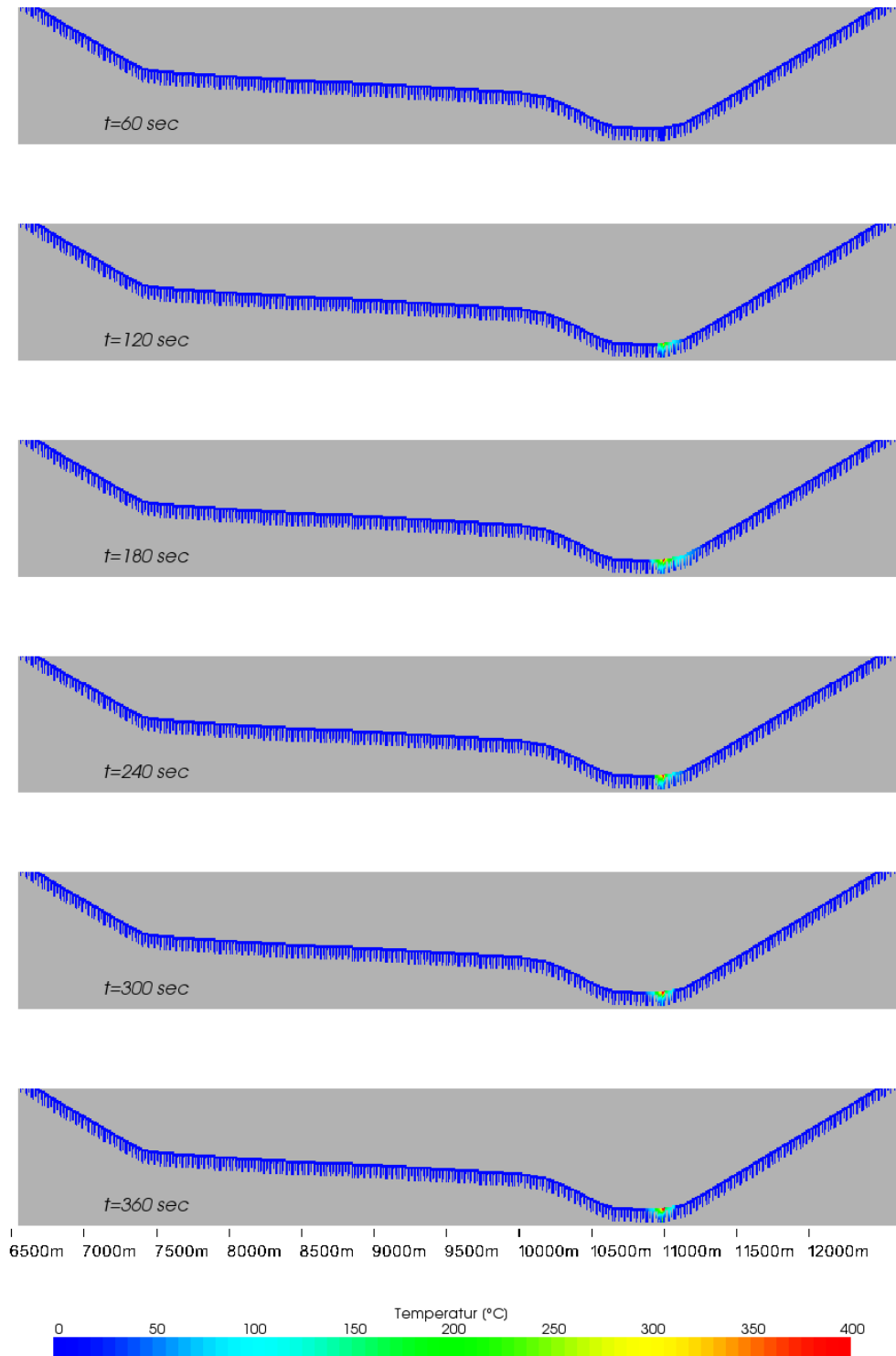
Die Ausbreitungsberechnungen erfolgten unter Annahme des Brandherdes in den Tiefpunkten der Tunnelröhren kurz vor dem Beginn bzw. dem Ende der Nordrampe. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen zu den 30 MW Bränden in der Oströhre (FR Nord) des Untersuchungstunnels für das Szenario Stau erläutert. Eine umfassende Zusammenstellung der Simulationsergebnisse für sämtliche weiteren Untersuchungsszenarien ist im Anhang dargestellt. Der Start des Brandes erfolgt in allen Szenarien 60 Sekunden nach Simulationsbeginn. Da die Ausbreitung der Einwirkgrößen sowohl vom jeweils zugrunde liegenden Lüftungssystem als auch von dem jeweiligen Steuerungskonzept abhängig sind, werden nachfolgend die Ergebnisse getrennt für den Referenzunnel und den Untersuchungstunnel dargestellt. Die Darstellung der Rechenergebnisse in den Ausbreitungsplots erfolgt fünffach überhöht.

#### **3.6.4.1 Temperaturverteilung 30 MW Brand**

##### **3.6.4.1.1 Referenzunnel nach RABT**

In Abbildung 15 sind die infolge eines 30 MW-Brandes entstehenden Temperaturverteilungen für den Referenzunnel dargestellt. Diese zeigt den Verlauf der Temperaturen bei einem Brand in der Oströhre.

Daraus geht hervor, dass für den Tunnelnutzer bis zum Wirksamwerden der Rauchabsaugung 120 s nach Brandbeginn in beiden Fällen kritische Temperaturen von über 100 °C in einem Abschnitt von ca. 300 m Länge auftreten. Bis zu diesem Zeitpunkt ist aufgrund der Kaminwirkung und der Kolbenwirkung der Fahrzeuge die Temperaturverteilung vom Brandherd deutlich nach rechts verschoben. Durch das Aktivieren der Rauchabsaugung treten die kritischen Temperaturen lediglich im unmittelbaren Brandherdbereich und an der Decke auf und werden 240 s nach Brandausbruch auf den Bereich zwischen den Rauchklappen beschränkt. Ab 300 s ist eine symmetrische Verteilung auf den Absaugbereich sowohl vor als auch nach dem Brandherd erreicht.



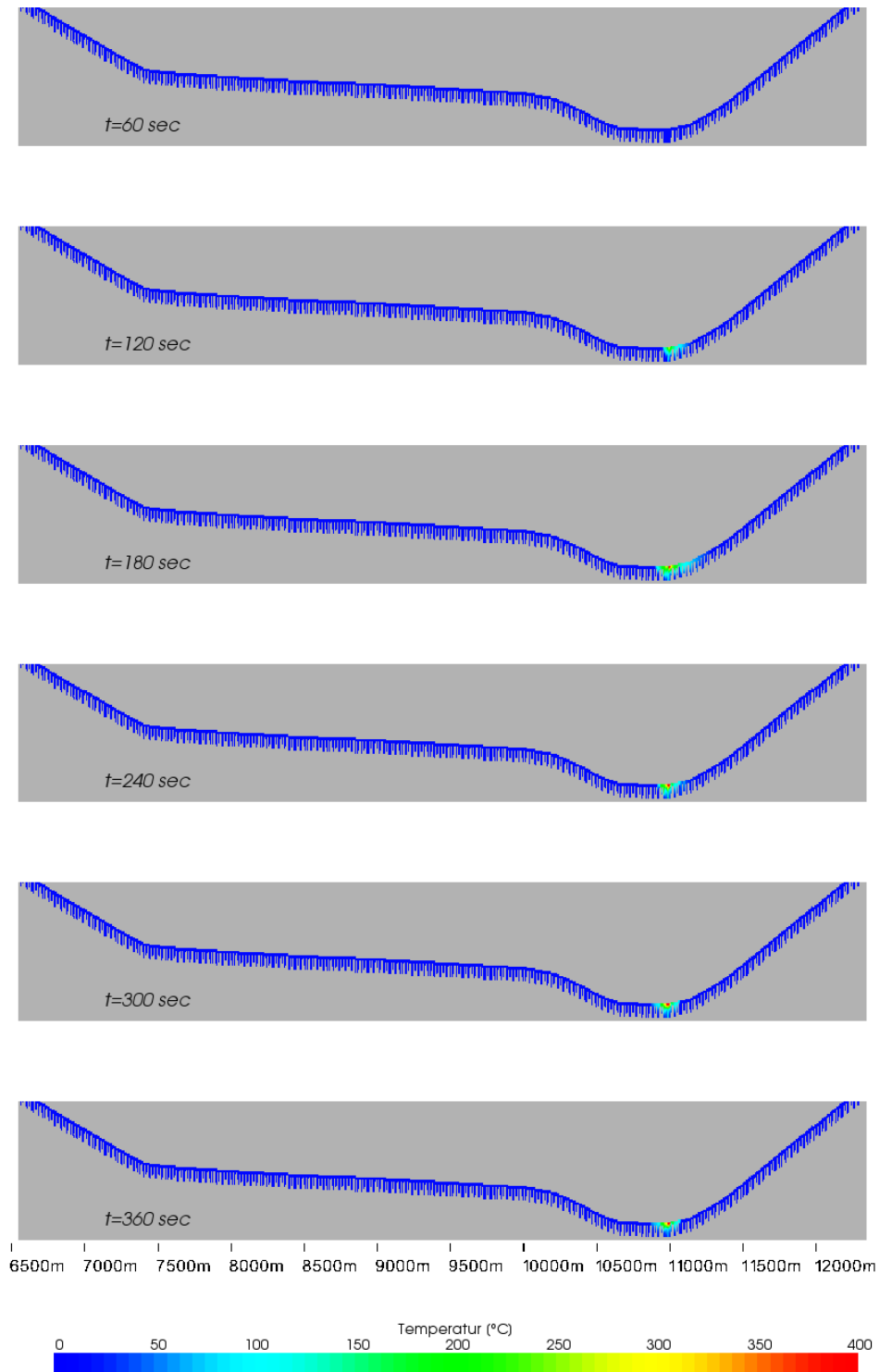
**Abbildung 15: Temperaturverteilung in Oströhre – Referenztunnel nach RABT**

#### 3.6.4.1.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Abbildung 16 zeigt die Temperaturverteilungen für den Untersuchungstunnel infolge eines 30 MW-Brandes in der Oströhre.

Im Fall eines Brandes wird nach dem Aktivieren des Brandprogramms durch die Lüftungssteuerung eine kontrollierte Ausbreitung zu beiden Seiten des Brandherdes erreicht. Im betrachteten Zeitintervall treten im Nullfall für den Tunnelnutzer kritische Temperaturen von über 100°C in einem Bereich von ca. 350 m auf und bleiben hierbei überwiegend auf den unmittelbaren Brandherdbereich und den Deckbereich beschränkt. Die größte Ausdehnung wird zum Simulationszeitpunkt 180 s erreicht. Ab diesem Zeitpunkt ist das Brandprogramm aktiv. Ein Temperaturanstieg über die Absaugzone hinaus ist nach Anlaufen des Brandprogramms nicht festzustellen.





**Abbildung 16: Temperaturverteilung in der Oströhre – Untersuchungstunnel**

### 3.6.4.1.3 Untersuchungstunnel (Planfall 1)

Abbildung 17 zeigt die Temperaturverteilungen für den Untersuchungstunnel infolge eines 30 MW-Brandes in der Oströhre bei verkürzter Detektion.

Durch die schnellere Detektion im Planfall 1 wird das Brandprogramm gegenüber dem Nullfall 45 sec früher aktiviert, so dass die Ausbreitung heißer Rauchgase bereits ab Simulationssekunde 135 eingedämmt wird. Dies wird auch aus nachfolgender Abbildung 17 ersichtlich. Im Vergleich zum Nullfall sind die höheren Temperaturen schon bei  $t = 180$  sec auf den Bereich der geöffneten Rauchgasklappen begrenzt.

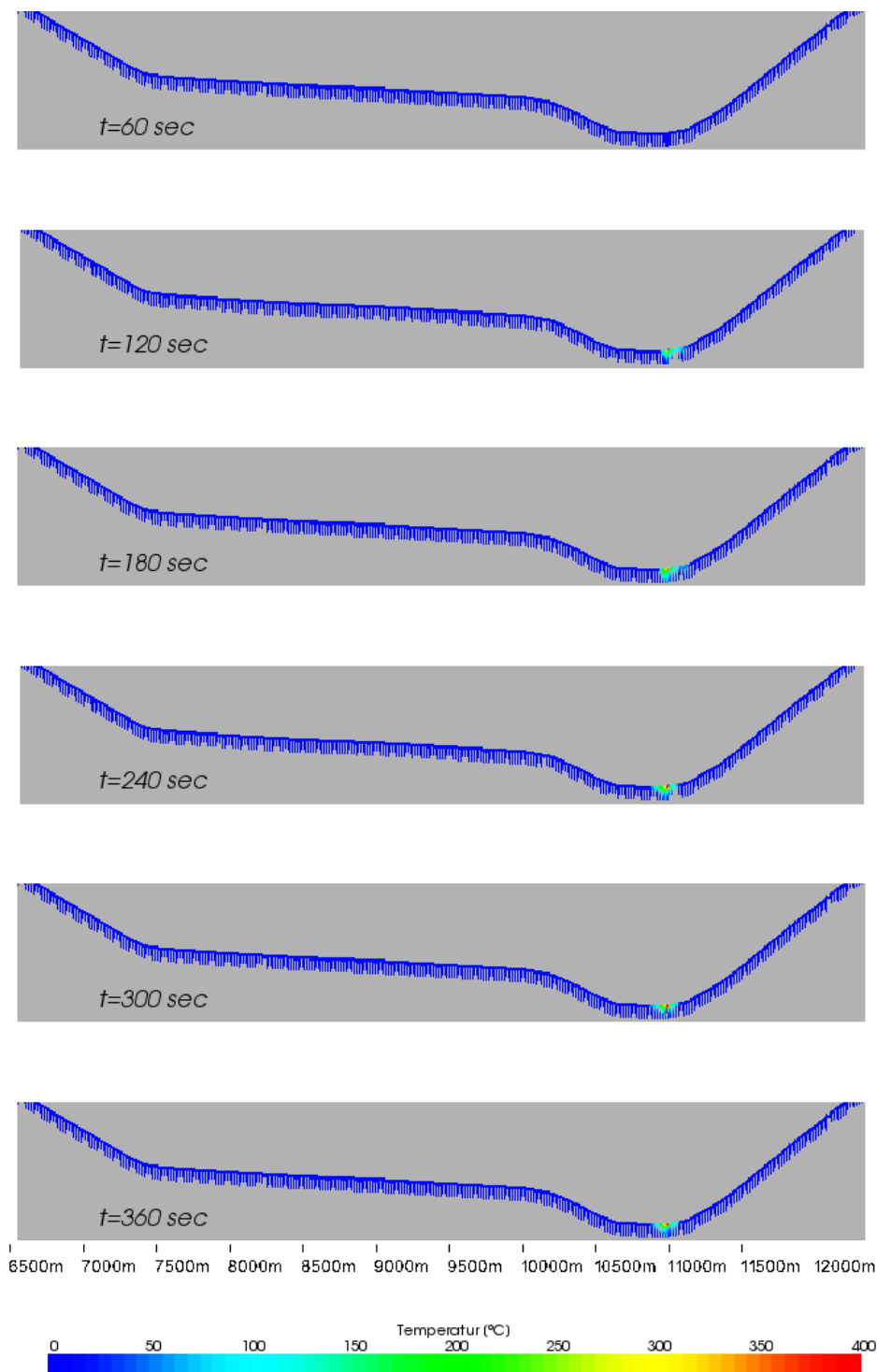


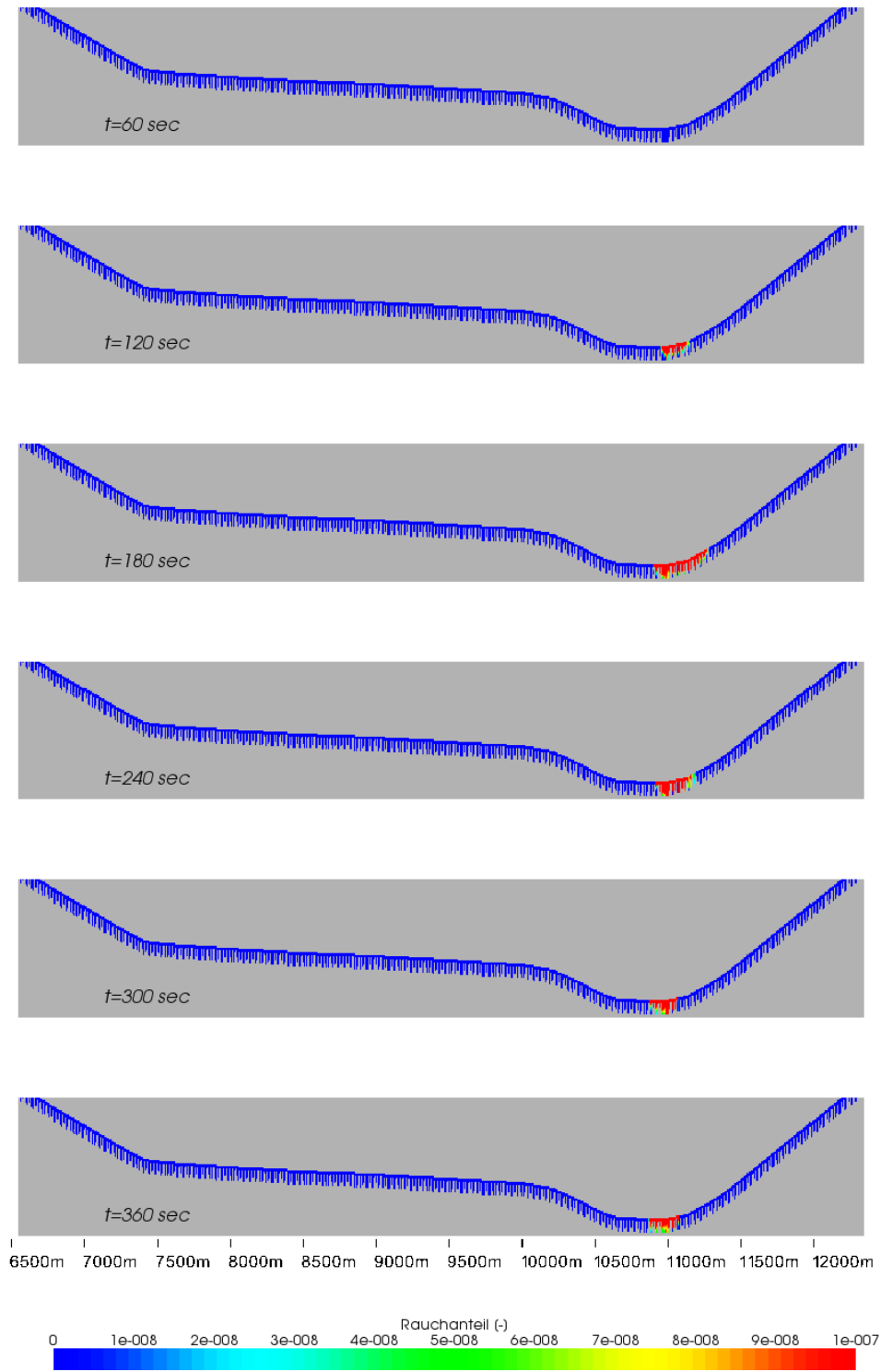
Abbildung 17: Temperaturverteilung in der Oströhre – Planfall 1

### **3.6.4.2 Rauchausbreitung 30 MW Brand**

#### 3.6.4.2.1 Referenztunnel nach RABT

In Abbildung 18 ist die Rauchausbreitung für einen 30 MW-Brand während eines Staus dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Rauchausbreitung im Falle eines Brandes nach der Aktivierung der Rauchabsaugung auf den Bereich zwischen den Rauchklappen begrenzt werden kann. Die maximale Ausbreitung von Rauch erfolgt über eine Abschnittslänge von ca. 350 m bis zum Zeitpunkt vor der Aktivierung des Brandprogramms (Simulationszeitpunkt 180 s).

Aufgrund des freigesetzten Rauchvolumens sind, trotz einer Absaugung an der Decke, Rauchkonzentrationen über die gesamte Querschnittsfläche verteilt zu verzeichnen.

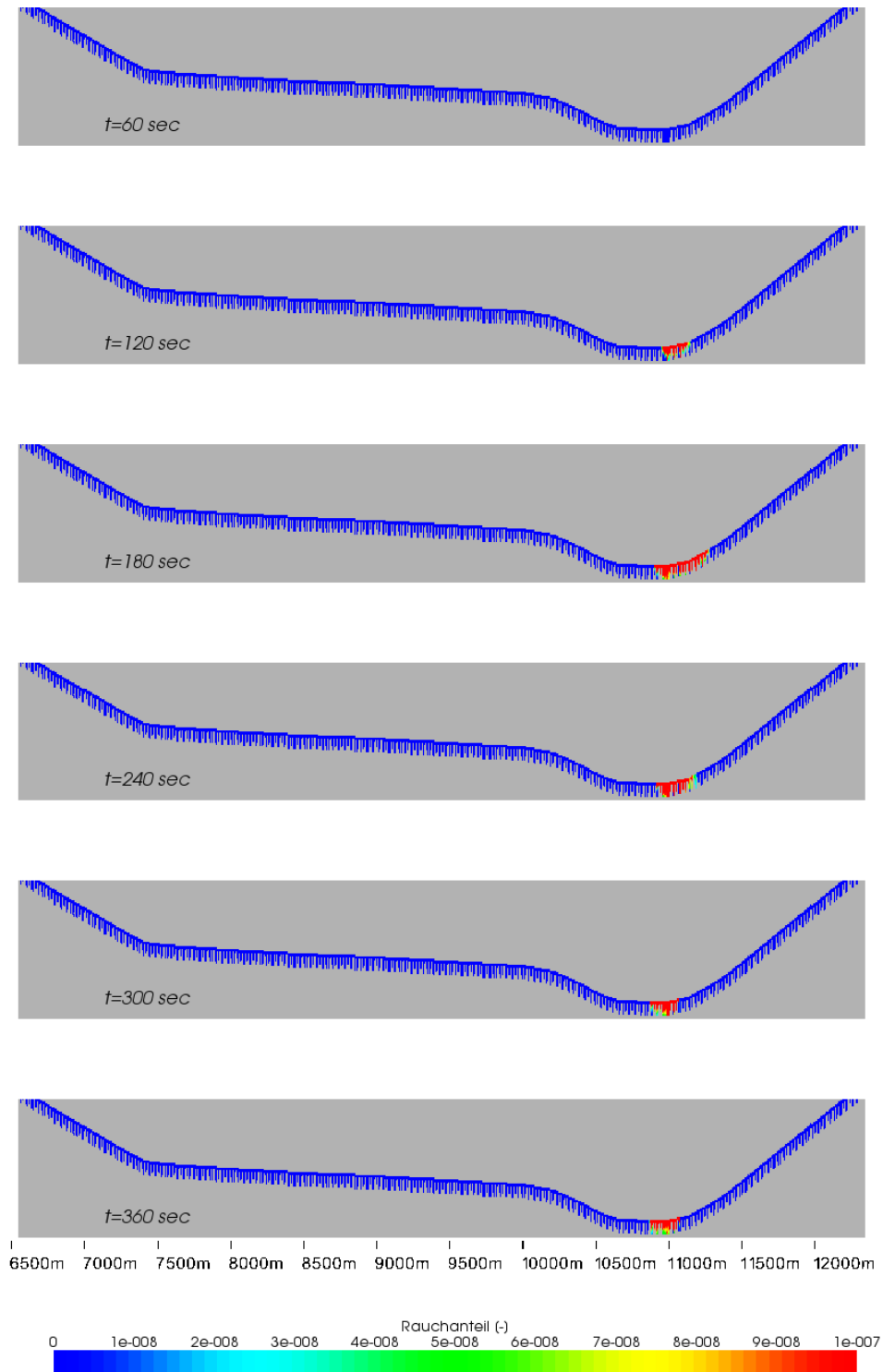


**Abbildung 18: Rauchausbreitung in Oströhre – Referenz-tunnel nach RABT**

#### 3.6.4.2.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Abbildung 19 zeigt die berechneten Rauchausbreitungen für einen 30 MW-Brand während eines Staus im Untersuchungstunnel.

Im Fall eines Brandes kommt es aufgrund der Lage des Brandortes in Verbindung mit der Kaminwirkung und der im Tunnel vorherrschenden Grundströmung von ca. 1,0 – 1,5 m/s zu einer Verschiebung der Rauchausbreitung in Richtung Nordportal. Ab Simulationszeitpunkt 180 s wirkt die Rauchabsaugung. Sie ist in der Lage, innerhalb von 60 s die Rauchausbreitung zu stoppen und die Rauchfront wieder in Richtung Brandherd zurück zu ziehen. Zum Simulationszeitpunkt 300 s ist der Rauch auf den Bereich der geöffneten Rauchklappen beschränkt. Aufgrund des freigesetzten Rauchvolumens und der durch die Ventilatoren verursachten Turbulenzen findet jedoch unmittelbar nach Brandausbruch eine Verteilung des Rauches über den gesamten Querschnitt statt. Drei Minuten nach Brandausbruch ist eine Verrauchung über eine Abschnittlänge von 400 m eingetreten.

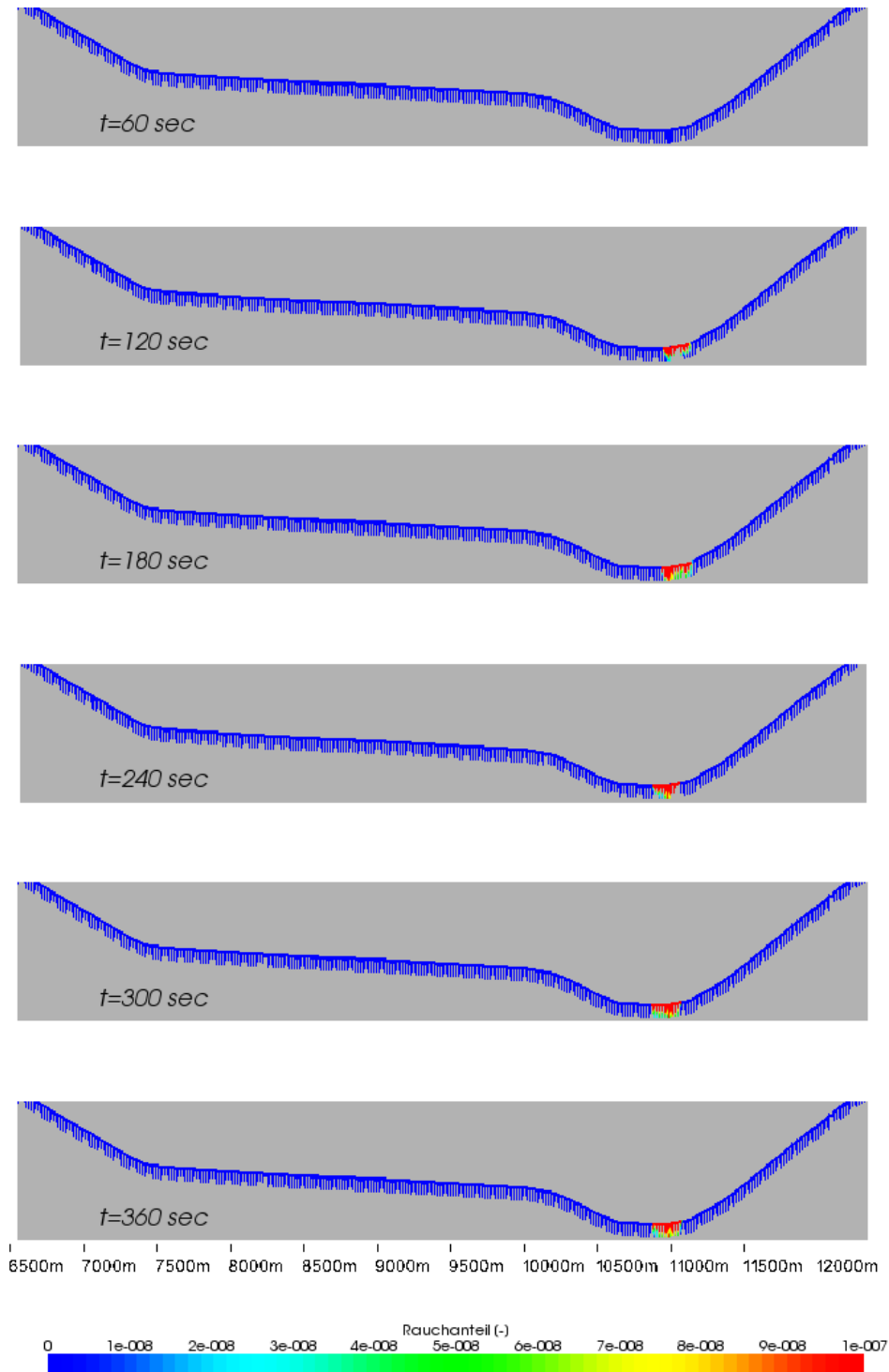


**Abbildung 19: Rauchausbreitung in Oströhre - Untersuchungstunnel**

### 3.6.4.2.3 Untersuchungstunnel (Planfall 1)

Abbildung 20 zeigt die berechneten Rauchausbreitungen für einen 30 MW-Brand während eines Staus im Untersuchungstunnel für den Fall einer verkürzten Detektion (Planfall 1).

Auch hier ist die positive Wirkung auf die Rauchausbreitung innerhalb der ersten 120 sec nach Brandbeginn aus dem Rauchausbreitungsbild abzulesen. Vergleicht man Abbildung 19 und Abbildung 20 zur Simulationssekunde 180 miteinander sind die Unterschiede deutlich erkennbar.



**Abbildung 20: Rauchausbreitung in Oströhre - Untersuchungstunnel**

Im Fall einer früheren Detektion setzt die Wirkung der Rauchabsaugung ebenfalls schneller ein und erzielt dadurch eine Minimierung der Rauchausbreitung. Bei der Aktivierung des Brandprogramms ohne verkürzte Detektion ist hier die stärkere Rauchausbreitung zum Portal hin deutlich erkennbar.

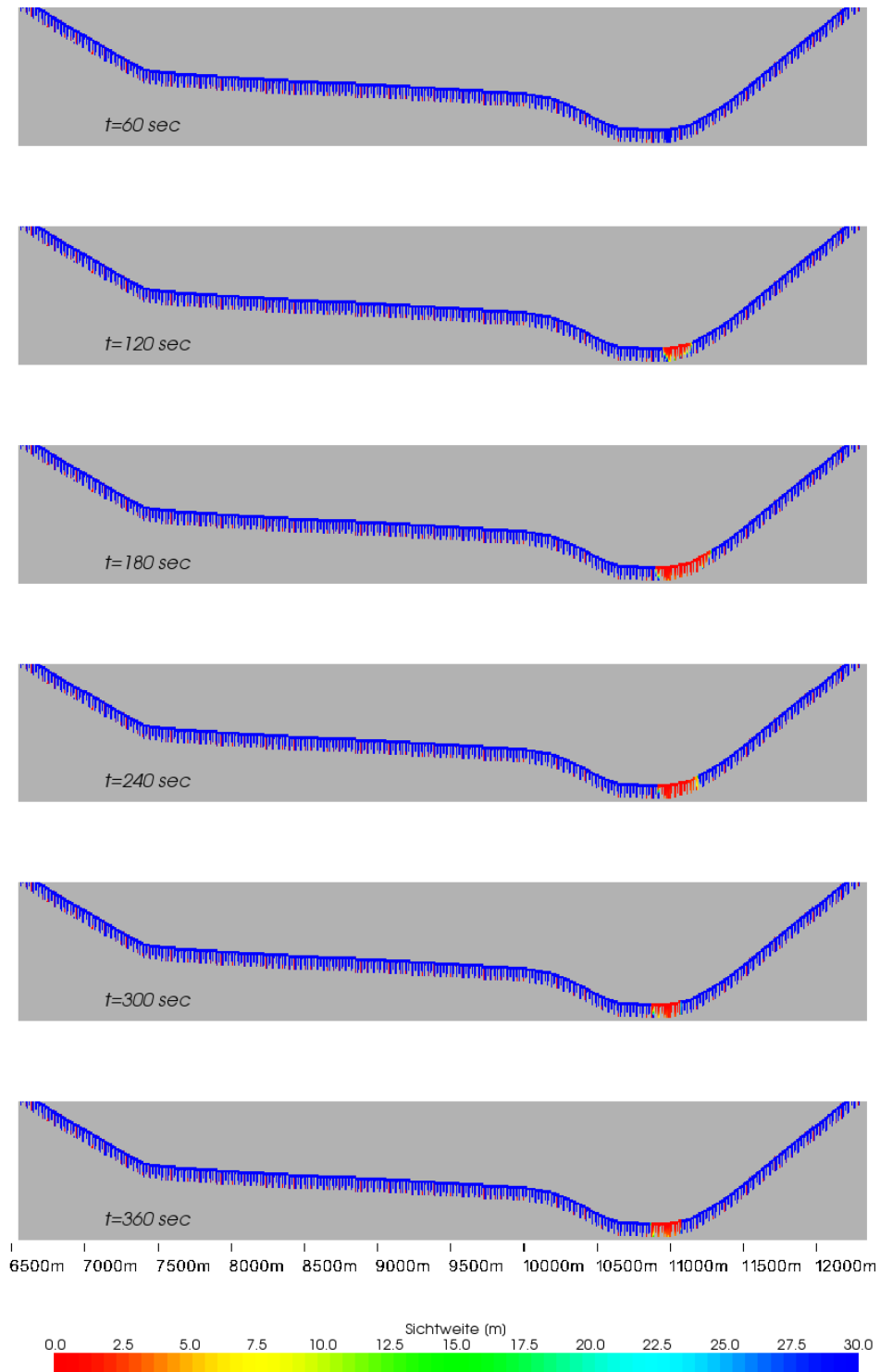


### **3.6.4.3 Sichtweiten 30 MW Brand**

#### **3.6.4.3.1 Referenztunnel nach RABT**

In Abbildung 21 sind die aus den Rauchkonzentrationen ermittelten Sichtweiten für einen 30 MW-Brand während eines Staus dargestellt. Sie zeigt die berechneten Sichtweiten infolge eines Brandes in der Oströhre.

Wie aus Abbildung 21 ersichtlich, stellen sich bei einem Brand in Bereichen mit Rauch sehr rasch Sichtweiten unter 5 m über den gesamten Querschnitt ein. Nach Aktivierung der Rauchabsaugung werden diese Bereiche jedoch auf die Absaugzone begrenzt, bzw. wird Rauch, der sich bereits über diesen Bereich hinaus ausgebreitet hat, wieder zurückgezogen. Die maximale Ausdehnung der Bereiche ohne ausreichende Sicht ergibt sich aus der Ausbreitung bis zur Aktivierung der Rauchabsaugung und beträgt ca. 350 - 400 m.

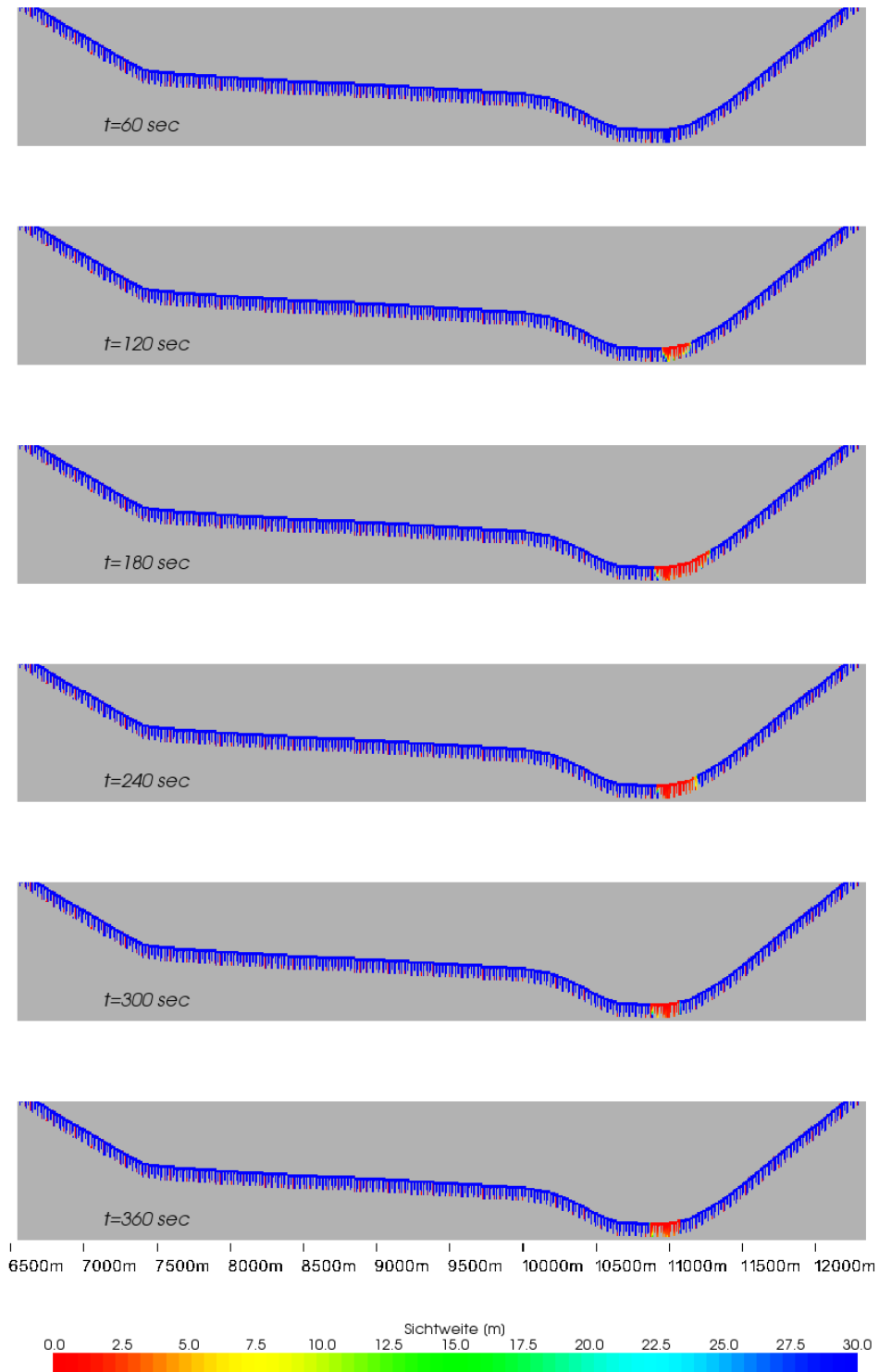


**Abbildung 21: Sichtweiten in Oströhre – Referenz隧nell nach RABT**

#### 3.6.4.3.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Abbildung 22 zeigt die ermittelten Sichtweiten für einen 30 MW-Brand während eines Stauereignisses.

Aufgrund des zugrunde liegenden Lüftungskonzeptes in Verbindung mit dem Brandherd im Tiefpunkt der Röhre und dem unmittelbar anschließenden Steigungsbereich ergibt sich bei einem Brand eine Verschiebung der Rauchausbreitung zum nördlichen Portal. Daraus resultiert, wie aus Abbildung 22 ersichtlich, 2 Minuten nach Brandausbruch ein Abschnitt von ca. 400 m Länge mit nicht ausreichenden Sichtverhältnissen. Danach setzt die Brandventilation ein, bei der die Rauchabsaugung in der Lage ist, die Ausbreitung zu begrenzen. Sie ist 4 Minuten nach Brandausbruch stabil auf einer Länge von ca. 200 - 250 m.

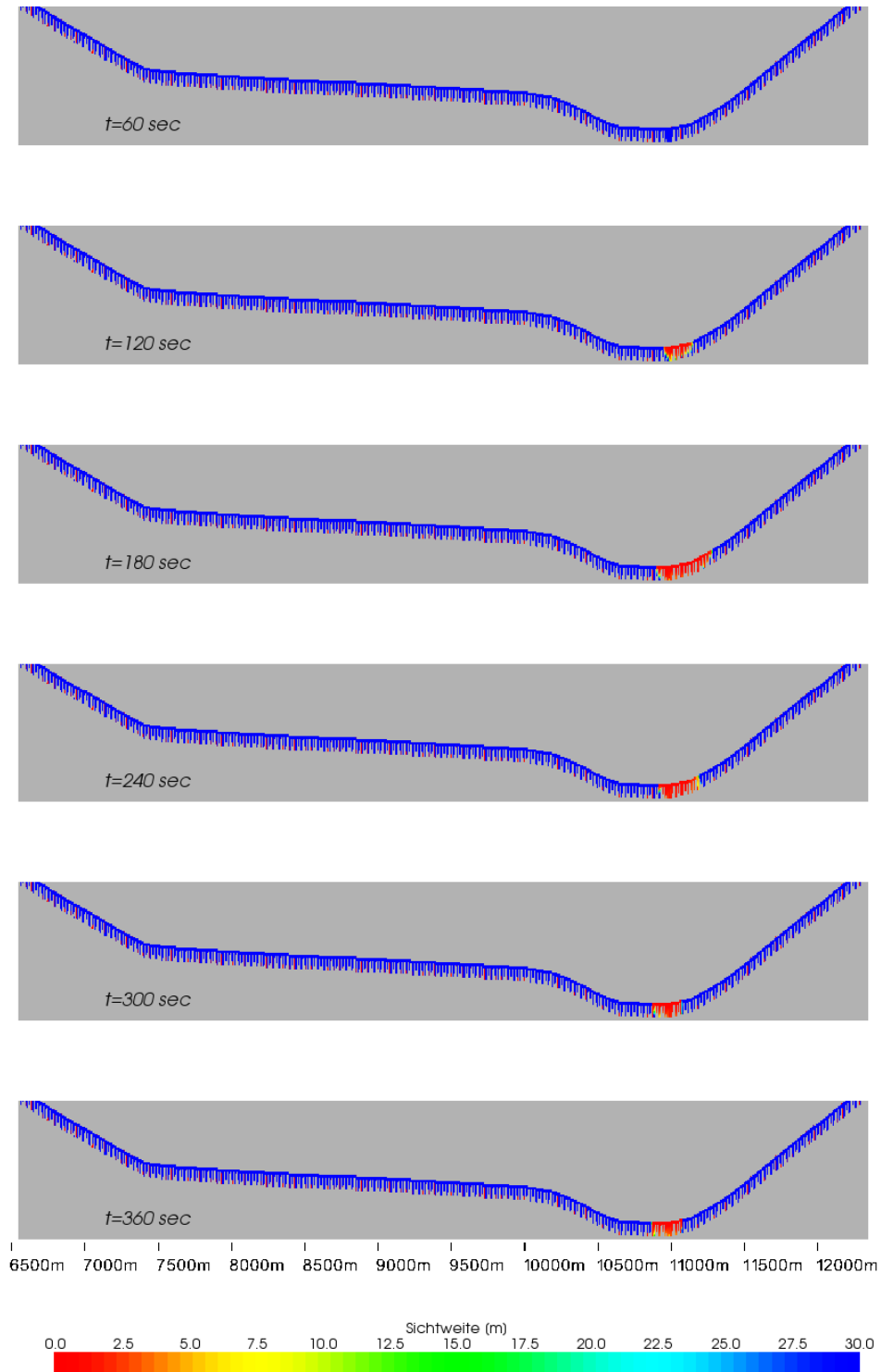


**Abbildung 22: Sichtweiten in Oströhre - Untersuchungstunnel**  
**Untersuchungstunnel (Planfall1)**

Abbildung 23 zeigt die ermittelten Sichtweiten für einen 30 MW-Brand während eines Stauereignisses bei verkürzter Detektion.

Durch die bereits aktive Rauchabsaugung ist 2 Minuten nach Brandausbruch ein Abschnitt von nur noch ca. 200-250 m Länge mit nicht ausreichenden Sichtver-

hältnissen vorhanden. Ohne Verkürzung der Detektionszeiten wäre eine Strecke von ca. 400 m betroffen. Dies hat deutliche Auswirkungen auf die Selbstrettungsbereiche und somit auf das zu erwartende Schadensausmaß.

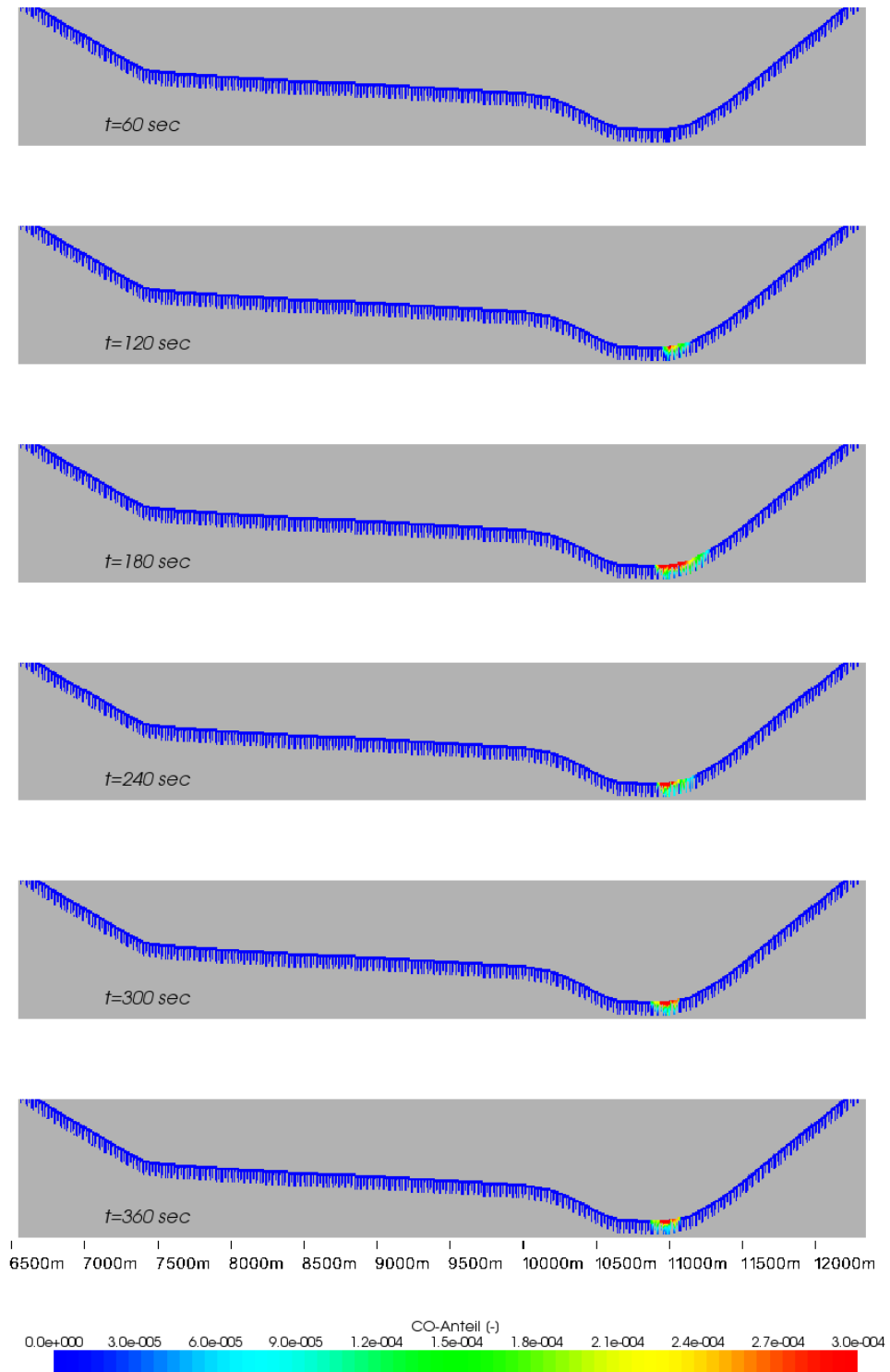


**Abbildung 23: Sichtweiten in Oströhre - Untersuchungstunnel**

### **3.6.4.4 CO-Ausbreitung 30 MW Brand**

#### 3.6.4.4.1 Referenztunnel nach RABT

In nachfolgender Abbildung 24 sind exemplarisch die Simulationsergebnisse zur CO-Ausbreitung infolge eines 30 MW-Brandes während eines Staus für die Ost-röhre des Referenztunnels dargestellt. Analog zur Ausbreitung der Temperaturen erfolgt die CO-Ausbreitung anfänglich überwiegend im oberen Bereich des Tunnelquerschnitts. Durch das Aktivieren der Rauchabsaugung wird die CO-Ausbreitung ebenfalls auf die Absaugzone begrenzt.



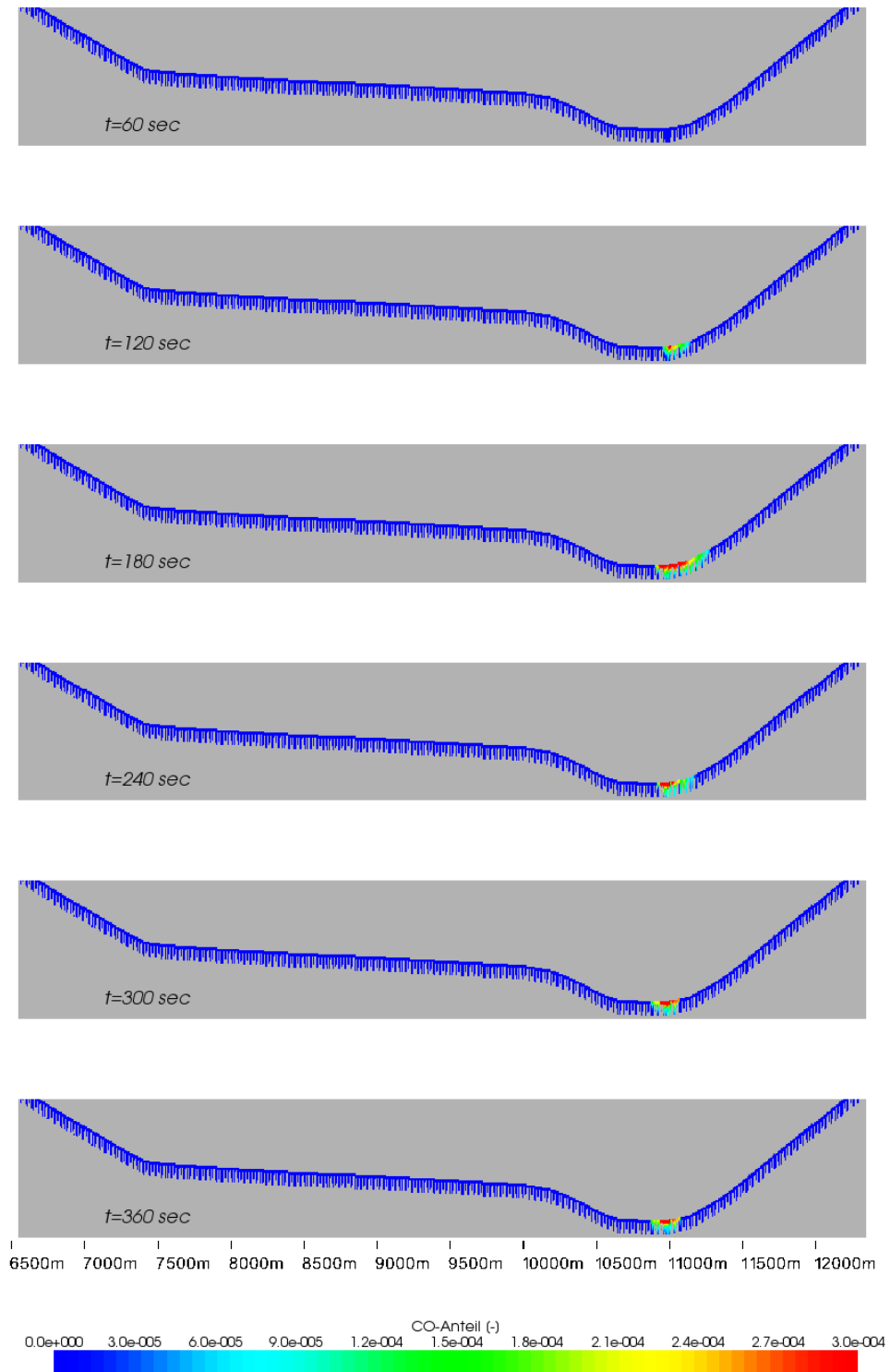
**Abbildung 24: CO-Ausbreitung in Oströhre – Referenzunnel nach RABT**

#### 3.6.4.4.2 Untersuchungstunnel (Nullfall)

Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Rechenergebnisse zur CO-Ausbreitung infolge eines 30 MW-Brandes im Untersuchungstunnel während eines Stauereignisses. In der Abbildung sind dabei die Ergebnisse für den Fall eines Brandes in der Oströhre dargestellt.

Die CO-Ausbreitung erfolgt in ähnlicher Weise zur Temperatúrausbreitung. Zu Beginn der Freisetzung erfolgt im Fall eines Brandes im Haupttunnel die Ausbreitung zunächst ebenfalls im oberen Querschnittsbereich. Mit zunehmender Ausbreitungsdauer ist jedoch auch auf Fahrbahnhöhe mit nennenswerten CO-Konzentrationen zu rechnen. Mit Aktivierung der Rauchabsaugung bleiben die Höchstkonzentrationen auf den Bereich der beiden dem Brandherd nächstgelegenen Rauchabsaugungsquerschnitte begrenzt. Im Bereich der Tunneldecke betragen die ermittelten CO-Konzentrationen bis zu 2370 ppm. Auf Fahrbahnhöhe sind im vorliegenden Fall CO-Konzentrationen von 475 ppm zu verzeichnen.





**Abbildung 25: CO-Ausbreitung in Oströhre - Untersuchungstunnel**

#### 3.6.4.4.3 Untersuchungstunnel (Planfall1)

Abbildung 26 zeigt beispielhaft die Rechenergebnisse zur CO-Ausbreitung infolge eines 30 MW-Brandes im Untersuchungstunnel während eines Stauereignisses unter Berücksichtigung der verkürzten Detektion. In der Abbildung sind dabei die Ergebnisse für den Fall eines Brandes in der Oströhre dargestellt.

Die CO-Ausbreitung erfolgt in ähnlicher Weise zur Temperatursausbreitung. Auch hier ist 2 Minuten nach Brand die aktivierte Rauchabsaugung gut zu erkennen. Die CO-Ausbreitung wird frühzeitig in den Bereich der Rauchabsaugzone zurück gezogen und letztendlich darauf begrenzt. Wie aus Abbildung 26 ersichtlich, ist spätestens 3 Minuten nach Brandausbruch eine stabile Ausbreitung erreicht, die sich nicht weiter ausdehnt.

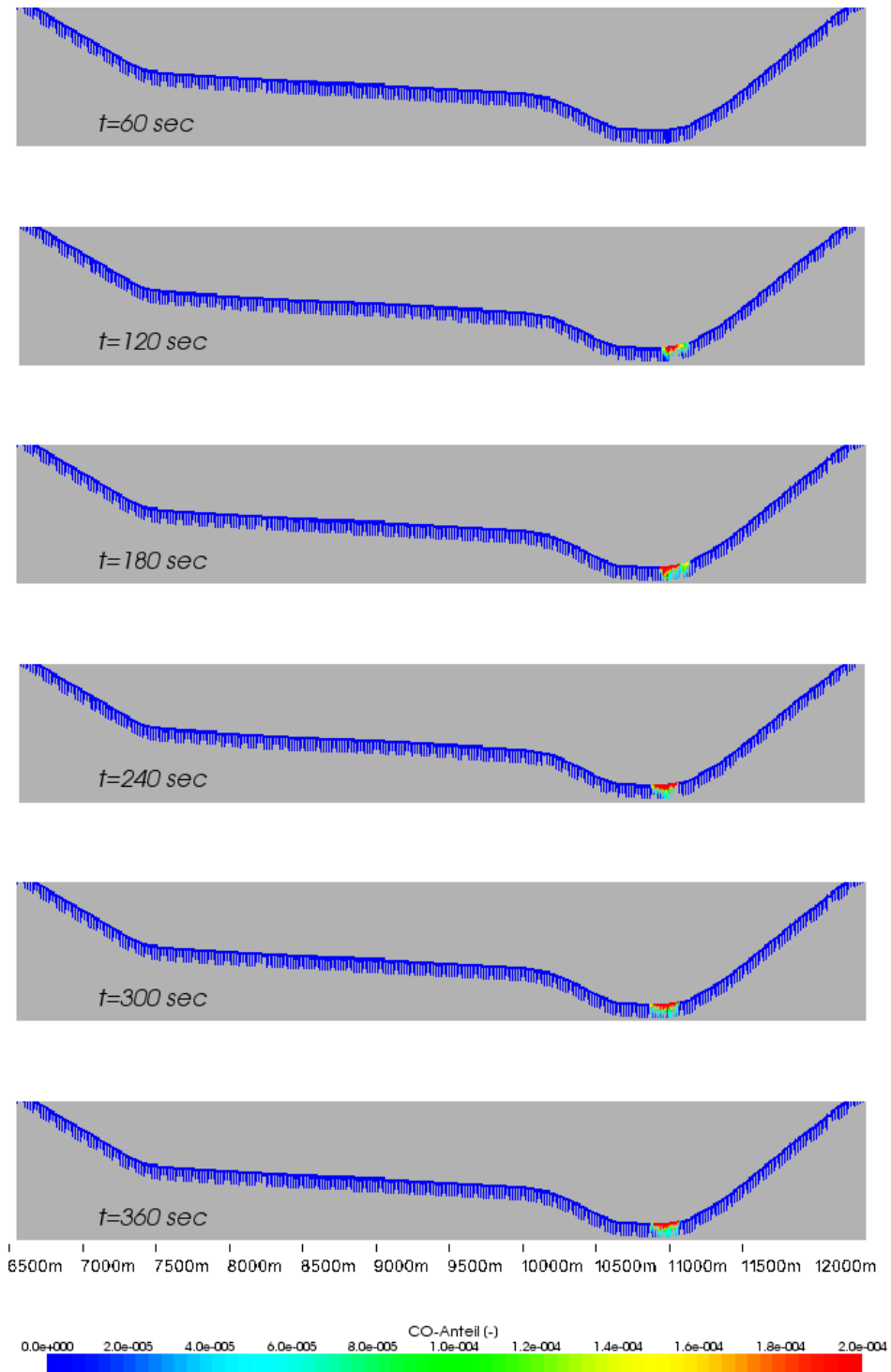


Abbildung 26: CO-Ausbreitung in Oströhre – Untersuchungstunnel

### 3.7 Mikroskopische Verkehrsflusssimulation

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer stationären Geschwindigkeitsüberwachungsanlage auf die Häufigkeit von Unfällen entlang der Untersuchungsstrecke wird die mikroskopische Verkehrsflusssimulationssoftware VISSIM verwendet

### **3.7.1 Modell**

VISSIM ist ein mikroskopisches, zeitschrittorientiertes und verhaltensbasiertes Simulationsmodell zur Nachbildung von Stadt- und Außerortsverkehr. Es besteht aus einem Verkehrsflussmodell und einem Modul für LSA-Steuerungen, die über eine Schnittstelle miteinander kommunizieren. Das Modul zur LSA-Steuerung ist für die nachfolgende Abschätzung nicht erforderlich und wird daher nicht weiter erläutert.

#### **3.7.1.1 Verkehrsflussmodell**

Das Verkehrsflussmodell bildet den Verkehrsablauf durch Einzelfahrzeuge unter Einbeziehung verschiedener geometrischer und verkehrlicher Randbedingungen wie z.B. der Fahrstreifenaufteilung, Verkehrszusammensetzung und Lichtsignalsteuerung ab. Darin ist ein Fahrzeugfolgemodell für die Nachbildung der Kolonnenfahrt auf einem Fahrstreifen und ein Fahrstreifenwechselmodell enthalten.

Das Fahrzeugfolgemodell basiert auf dem psycho-physischen Wahrnehmungsmodell von WIEDEMANN (1974). Nach diesem Modellansatz beginnt ein Fahrer eines schneller fahrenden Fahrzeuges bei Erreichen seiner individuellen Wahrnehmungsschwelle zum vorausfahrenden Fahrzeug zu bremsen. Da er die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs jedoch nicht genau einschätzen kann, sinkt seine Geschwindigkeit im Weiteren unter dessen Geschwindigkeit. Wird im Folgenden eine untere Wahrnehmungsschwelle erreicht, beginnt er wieder zu beschleunigen. Dadurch kommt es zu einem ständigen leichten Beschleunigen und Verzögern. Verteilungsfunktionen über Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten tragen dem unterschiedlichen Fahrerverhalten Rechnung. Abbildung 27 zeigt den prinzipiellen Ablauf im psycho-physischen Abstandsmodell.

In dem implementierten Fahrstreifenwechselmodell berücksichtigt ein Fahrer auf mehrstreifigen Fahrbahnen nicht mehr nur die unmittelbar vorausfahrenden Fahrzeuge, sondern auch die Fahrzeuge auf den beiden Nachbarfahrstreifen. Nähert sich nun ein Fahrer mit einer höheren Geschwindigkeit an ein langsames, vorausfahrendes Fahrzeug an, wird bei freiem Nachbarstreifen mit Erreichen seiner individuellen Wahrnehmungsschwelle ein Spurwechselvorgang vorgenommen.

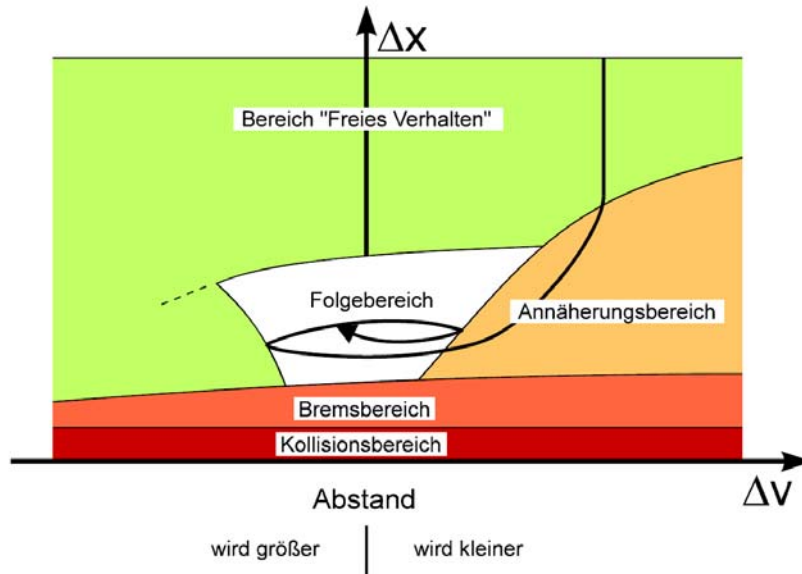


Abbildung 27: Psycho-physisches Abstandssmodell nach Wiedemann

### 3.7.1.2 Stationäre Geschwindigkeitsüberwachung

Zur Abschätzung der Auswirkungen einer stationären Geschwindigkeitsüberwachungsanlage werden nachfolgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- ▶ die Tunnellänge,
- ▶ die Tunnelgradiente,
- ▶ die Anzahl der Fahrspuren,
- ▶ die Verkehrsstärke im Tagesverlauf,
- ▶ der LKW-Anteil,
- ▶ die relevanten fahrdynamischen Eigenschaften der Kraftfahrzeuge, sowie
- ▶ die Wunschgeschwindigkeitsverteilungen ohne/ mit Geschwindigkeitsüberwachung.

Zur Abbildung der Effekte einer stationären Geschwindigkeitsüberwachungsanlage werden zwei Untersuchungsfälle betrachtet, die sich in der Wunschgeschwindigkeitsverteilung simulierter Fahrzeuge unterscheiden.

Variante 1 (Nullfall) stellt das Szenario ohne stationäre Geschwindigkeitsüberwachung dar. Die Wunschgeschwindigkeiten der simulierten PKW erreichen Werte bis 100 km/h, bei LKW bis zu 86 km/h.

Variante 2 (Planfall 2) stellt das Szenario mit stationärer Geschwindigkeitsüberwachung dar. Die Wunschgeschwindigkeiten der simulierten PKW überschreiten den

Wert von 83 km/h nicht. Die maximalen Wunschgeschwindigkeiten der LKW verringern sich auf 81 km/h.

Es wird der Verkehrsablauf eines Tages (24 h) simuliert. Die Berechnungen werden mehrfach durchgeführt, wobei eine den Zufallsgenerator der Software beeinflussende Zahl variiert und darüber der stochastische Charakter des Straßenverkehrs berücksichtigt wird.

Ergebnisse des Simulationen sind folgende Kenngrößen:

►  $Kenn_{Spurwechsel}$  :

die Anzahl von Spurwechseln zur linken Fahrspur im Tunnelbereich,  
sowie

►  $Kenn_{Relativgeschwindigkeit}$  :

die Anzahl von Relativgeschwindigkeiten von über 10 km/h zwischen zwei Fahrzeugen im Verlauf des simulierten Tages.

Die Kenngrößen werden für beide Tunnelröhren getrennt betrachtet.

Die Abschätzung der Unfallhäufigkeiten geschieht getrennt für zwei Unfalltypengruppen. Die erste Gruppe umfasst Unfälle des Unfalltyps 6, die zweite alle restlichen Unfälle. Diese Aufspaltung ist notwendig, da die verwendete Methodik lediglich Aussagen zur Entwicklung der Unfallhäufigkeiten von Unfällen des Unfalltyps 6 (Unfälle im Längsverkehr) trifft. Unfälle des Unfalltyps 6 umfassen Kollisionen durch Auffahren eines Fahrzeugs auf ein langsames Vorderfahrzeug, sowie durch Spurwechsel verursachte Kollisionen. Der Anteil von Unfallhäufigkeiten von Unfällen des Unfalltyps 6 an allen im untersuchten Tunnel vorkommenden Unfällen wird zu 78,5 % berechnet.

Zunächst wird die Unfallhäufigkeit aller Unfälle im Nullfall mittels Unfallkenngrößen abgeschätzt. Hieraus werden die Häufigkeiten von Unfällen des Unfalltyps 6, sowie der restlichen Unfälle ermittelt:

$$H(\text{Unfall})_{UF1,UT6} = H(\text{Unfall})_{UF1,ges} \cdot 0,785$$

$$H(\text{Unfall})_{UF1, andere} = H(\text{Unfall})_{UF1,ges} \cdot (1 - 0,785)$$

mit

$$H(\text{Unfall})_{UF1,ges}$$

absolute Häufigkeit von Unfällen im Nullfall

$$H(\text{Unfall})_{UF1,UT6}$$

absolute Häufigkeit von Unfällen ausgenommen der Unfälle des Unfalltyps 6 im Nullfall

Die Abschätzung der Unfallhäufigkeit von Unfällen des Unfalltyps 6 im Planfall 2 geschieht durch Multiplikation der absoluten Häufigkeit von Unfällen des Unfalltyps 6 im Nullfall mit den Faktoren der durch Simulation ermittelten Kenngrößen.

$$H(\text{Unfall})_{UF2,UT6} = H(\text{Unfall})_{PF1,UT6} \cdot \frac{\left( \frac{Kenn_{UF1,Spurwechsel}}{Kenn_{UF2,Spurwechsel}} + \frac{Kenn_{UF1,Relativgeschwindigkeit}}{Kenn_{UF2,Relativgeschwindigkeit}} \right)}{2}$$

Die absolute Häufigkeit von Unfällen, die nicht dem Unfalltyp 6 zuzuordnen sind, wird vereinfachend als durch die stationäre Geschwindigkeitsüberwachung nicht beeinflusst abgeschätzt.

$$H(\text{Unfall})_{UF2, andere} = H(\text{Unfall})_{UF1, andere}$$

Die Abschätzung der Unfallhäufigkeit aller Unfälle im Planfall 2 erfolgt anhand folgender Formel:

$$H(\text{Unfall})_{UF2, ges} = H(\text{Unfall})_{UF2, UT6} + H(\text{Unfall})_{UF2, andere UT}$$

### 3.7.1.2.1 Simulationsergebnisse

Wie nachfolgende Tabelle 7 zeigt, beträgt in der Oströhre die Anzahl gemessener Spurwechsel zur linken Fahrspur im Planfall 2 ca. 72% des im Nullfall gemessenen Wertes. Die Anzahl gemessener Relativgeschwindigkeiten höher 10 km/h fällt gegenüber dem Planfall 1 auf ca. 39% ab.

Tunnelröhre	Kennwert	Nullfall (ohne Überwachung)	Planfall 2 (mit Überwachung)	Faktor
Oströhre	Spurwechsel [1/Tag]	32033	22979	0,717
	vRel > 10 km/h [1/Tag]	20990	8180	0,39

Tunnelröhre	Kennwert	Nullfall (ohne Überwachung)	Planfall 2 (mit Überwachung)	Faktor
Weströhre	Spurwechsel [1/Tag]	31608	22072	0,698
	vRel > 10 km/h [1/Tag]	15364	3510	0,229

**Tabelle 7: Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf Spurwechselforgänge & Relativgeschwindigkeit**

In der Weströhre verringert sich die Anzahl der Spurwechsel zur linken Fahrspur in Planfall 2, verglichen mit Nullfall, auf ca. 70%. Die Anzahl der Relativgeschwindigkeiten höher 10 km/h fällt auf ca. 23% ab. Die sich dadurch ergebenden Unfallhäufigkeiten Planfall 2 sind in nachfolgender Tabelle 8 denen des Nullfalls gegenübergestellt.

Tunnelröhre	Kennwert	Nullfall (ohne Überwachung)	Planfall 2 (mit Überwachung)	Faktor
Oströhre	Unfallhäufigkeit [Unfälle/Jahr]	9,48	5,33	0,56
Weströhre	Unfallhäufigkeit [Unfälle/Jahr]	9,48	3,33	0,35

**Tabelle 8: Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Unfallhäufigkeit**

Die Tabelle 8 zeigt auf, dass Unfallhäufigkeiten im Planfall 2 in der Oströhre zu ca. 56%, in der Weströhre zu ca. 35% gegenüber dem Nullfall abgeschätzt werden. Demnach erfolgt in beiden Tunnelröhren, durch die stationäre Geschwindigkeitsüberwachung ein deutlicher Rückgang der Unfallhäufigkeiten.

Da die abgeschätzten Unfallhäufigkeiten Eingangswerte der Ereignisbäume darstellen, ergeben sich veränderte Häufigkeits-Ausmaß-Kurven, sowie die damit verbundenen Risikowerte. Diese sind im Kapitel 3.9.4 einander gegenübergestellt.

### 3.8 Risikoberechnung

Die Quantifizierung von Risiken erfordert die Kenntnis über die Häufigkeit, mit der bestimmte Schadensereignisse eintreten. Als Maß für das Risiko dient dann die Verknüpfung von Schadensausmaß mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit, sowie einem auswirkungsabhängigen Aversionsfaktor. Das Risiko ist wie folgt definiert:



Risiko = Häufigkeit des Eintritts \* Größe der Auswirkungen \* Aversionsfaktor

Als Aversionsfaktor  $\varphi$  wird der im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ verwendete Aversionsfaktor übernommen. Hierbei wird für Personenschäden (Todesopfer) folgende Formel verwendet:

$$\varphi = \sqrt{\text{Schadensausmaß}}$$

Der Aversionsfaktor trägt dem Wunsch Rechnung seltenerere Ereignisse mit größeren Ausmaßen stärker zu gewichten als häufigere Ereignisse mit geringeren Auswirkungen, da sie von der Öffentlichkeit als schwerwiegender empfunden werden. Nachfolgend werden die Prinzipien der im Rahmen dieser Untersuchung eingesetzten Methoden zur Häufigkeits- und Ausmaßermittlung erläutert.

Der so bestimmte Schadenerwartungswert wird auch als bewertetes kollektives Risiko bezeichnet.

### 3.8.1 Häufigkeitsermittlung

Zur Häufigkeitsermittlung werden von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) ausgehend deduktiv alle möglichen Zwischenzustände bis hin zu den Endzuständen des Systems ermittelt und diese hinsichtlich ihrer zu erwartenden Häufigkeit quantifiziert. Zu Beginn der Modellierung des Ablaufes steht die Identifizierung der möglichen Systemantworten. Dabei handelt es sich um die Reaktion des Systems auf technische Betriebs- und Sicherheitssysteme sowie die Reaktion auf Eingriffe von Menschen. Vom auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) aus werden die angeforderten Systemantworten (zum Beispiel die eines Sicherheitssystems) abgefragt und es wird unterschieden, ob ein Erfolg oder ein Versagen vorliegt. An diesem Punkt verzweigt sich der Ereignisablauf in weitere Zwischenzustände. Die Zwischenzustände werden analog zu denen des auslösenden Ereignisses auf Systemantworten untersucht. So entstehen bis zum Erreichen eines Endzustandes unterschiedliche Zweige des Ereignisablaufes. Zur besseren Veranschaulichung dieses Ereignisablaufes werden s. g. Ereignisbäume verwendet, die über Linien eine graphische Darstellung des Ablaufes wiedergeben (siehe Abbildung 28).

Bei der Modellierung der Ereignisbäume sind folgende Regeln zu beachten:

- Für jedes auslösende Ereignis wird für sich ein detailliertes Ablaufdiagramm erstellt.

► Der Zweig des Ereignisablaufes wird bis zu dem Zeitpunkt verfolgt, wo das System einen endgültigen Zustand (Endzustand) erreicht hat und eine weitere Verzweigung nicht mehr möglich ist.

Eine weitere Betrachtung für beherrschte Ereignisabläufe (zum Beispiel Erfolg eines Sicherheitssystems) kann notwendig sein, wenn sich die Randbedingungen durch Einflussfaktoren wie Zeit oder andere Systemausfälle ändern können.

► Die Systemantworten werden im Ablaufdiagramm in der zeitlichen Reihenfolge ihres Auftretens aufgeführt.

► Es werden nur Systemantworten dargestellt, die eine unmittelbare Wirkung auf die Ablaufentwicklung der Ereignisse haben. Alle mittelbar benutzten Subsysteme, wie zum Beispiel das der Energieversorgung, sind nicht Bestandteil der Ablaufentwicklung, sondern werden in den zugehörigen Verzweigungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden über folgende Formel berechnet:

$$H_{ei} = H_0 \prod_i (P_{\text{Verzweigungswahrscheinlichkeiten}} \text{ im Zweig } i)$$

Für diese Berechnung werden die Häufigkeiten des auslösenden Ereignisses und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten benötigt.

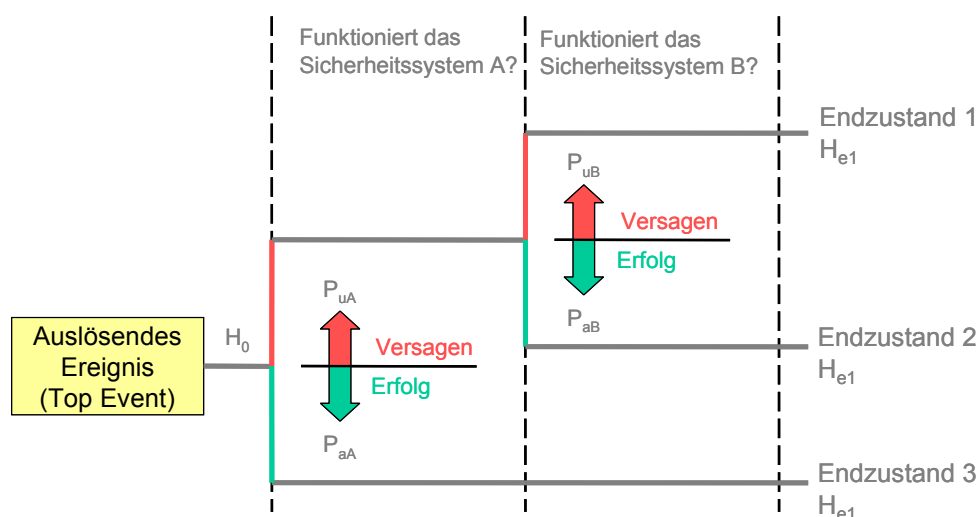


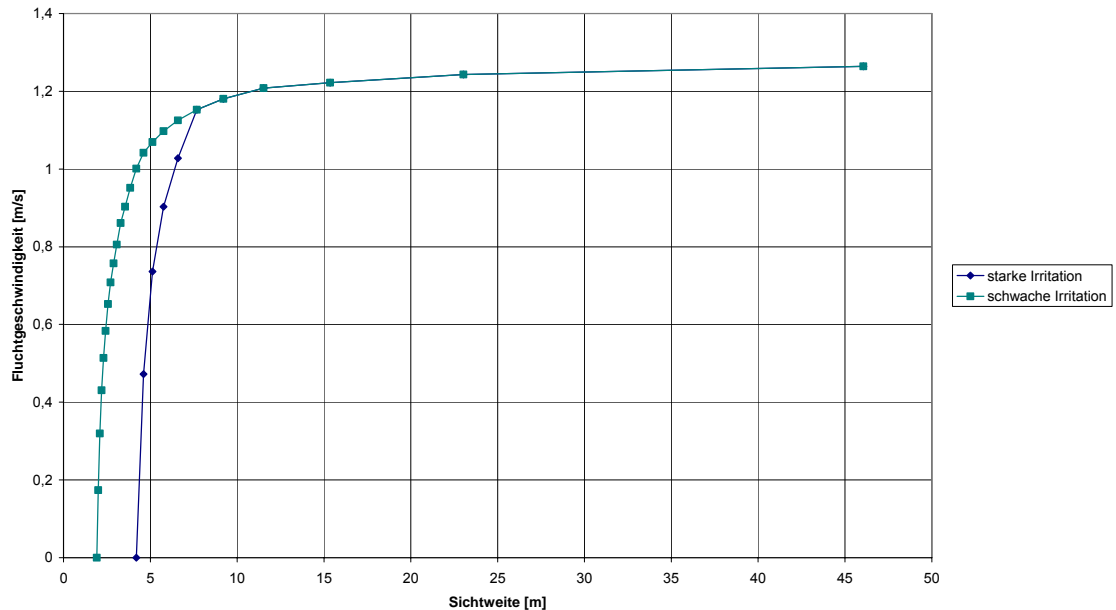
Abbildung 28: Beispiel für einen Ereignisbaum (MAY, 2003b)

## **3.8.2 Ausmaßermittlung**

Das personenbezogene Schadenausmaß wird durch mehrere sich überlagernde Effekte bestimmt. Das Schadensausmaß ist zum einen abhängig von den Einwirkungen auf den menschlichen Organismus infolge äußerer Einflüsse durch Druck, Temperatur, Rauch und zum anderen von der Anzahl der potentiell betroffenen Personen im betreffenden Abschnitt. Beides sind hoch dynamische Vorgänge. Die Ausbreitung von Temperatur und Rauch unterliegt fluiddynamischen Gesetzmäßigkeiten. Die Anzahl der betroffenen Personen ist abhängig von der verkehrlichen Situation, dem Zeitpunkt der Detektion eines Ereignisses und Sperrung eines Tunnels sowie den momentanen Fluchtbedingungen im Tunnel. Nachfolgend werden die Verfahren und Methoden zur Bestimmung des Schadensausmaßes erläutert.

### **3.8.2.1 Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit**

In Untersuchungen [MAY 2006] konnte gezeigt werden, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der vorhandenen Sichtweite. 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 und Atemwege, 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 Flucht-geschwindigkeit für reflektierende Objekte (MAY 2006)**

### 3.8.2.2 Toxizität von Brandgasen

Bei realen Bränden werden i.d.R. eine Reihe von toxisch wirkenden Schadstoffen über den Plume an die Umgebung abgegeben. Von der Vielzahl der im Brandrauch enthaltenen toxischen Rauchgaskomponenten wirken im Wesentlichen Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) akut toxisch auf den Menschen. Beide Gase wirken bereits in geringen Konzentrationen narkotisch und führen bei längerer Expositionsdauer oder bei höheren Konzentrationen sehr rasch zum Tod.

Kohlenmonoxid entsteht bei praktisch jedem Verbrennungsvorgang infolge unvollständiger Verbrennungsprozesse. Es gehört zu der Gruppe der farb- und geruchslosen Gase. Es ist darüber hinaus schwer wasserlöslich und dringt daher bis in tiefe Lungenregionen vor. Seine schädigende Wirkung liegt in der gegenüber dem Sauerstoff ca. 250-fach höheren Affinität zum Blutfarbstoff Hämoglobin. Das dabei entstehende Carboxyhämoglobin (CO-Hb) reduziert den Sauerstofftransport im Blut. Bereits ab einem Anteil von ca. 20 % CO-Hb im Blut treten erste toxische Wirkungen auf und führen ab einem Anteil von ca. 40 % zur Bewusstlosigkeit. CO-Hb-Konzentrationen zwischen 50 % und 70 % führen schließlich zum Tod.

Blausäure weist gegenüber Kohlenmonoxid eine ca. zehnmal höhere Toxizität auf (vgl. Abbildung 30). Es entsteht bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Materialien. Hierzu zählen beispielsweise Acryl, Nylon, Polyurethan und Wolle. Das Blausäuregas ist im Gegensatz zum Kohlenmonoxid leicht wasserlöslich und kann daher

durch den menschlichen Organismus sowohl oral als auch durch Inhalation aufgenommen werden. Untersuchungen zeigen, dass bereits Konzentrationen von 180 bis 270 ppm in der Atemluft bei kurzzeitiger Exposition und Konzentrationen von 90 ppm bei längerer Exposition zum Tode führen.

Beide Brandgase können unabhängig voneinander ihre toxische Wirkung entfalten, d.h. ihre Wirkungen können sich addieren.

In Abbildung 30 sind die Konzentrationen für Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) in Abhängigkeit von der Expositionszeit aufgetragen, ab denen mit Bewusstlosigkeit zu rechnen ist.

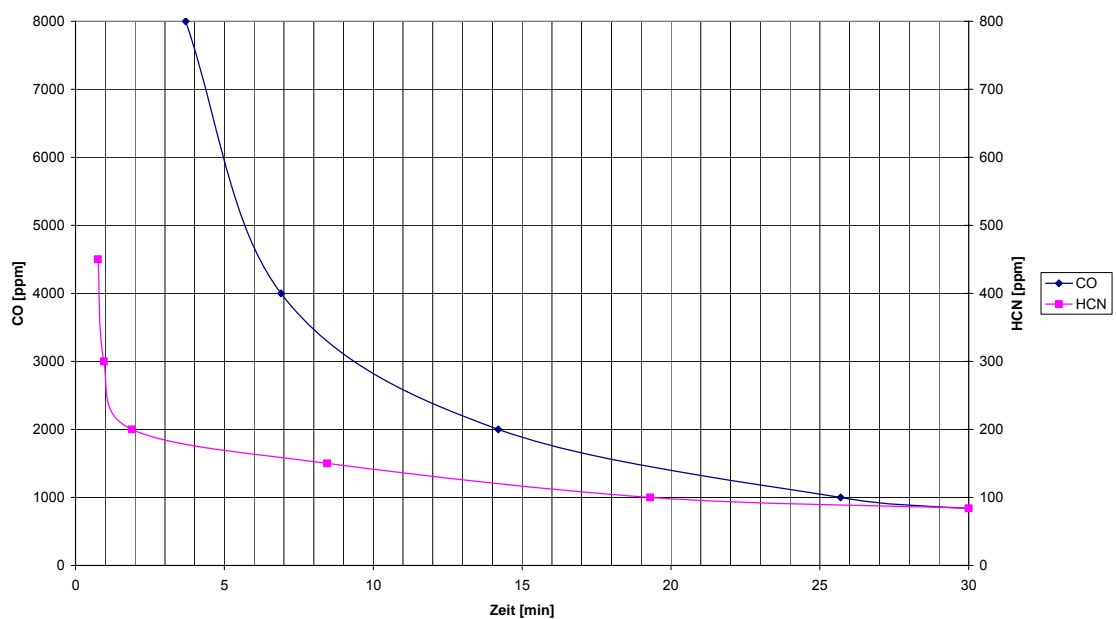


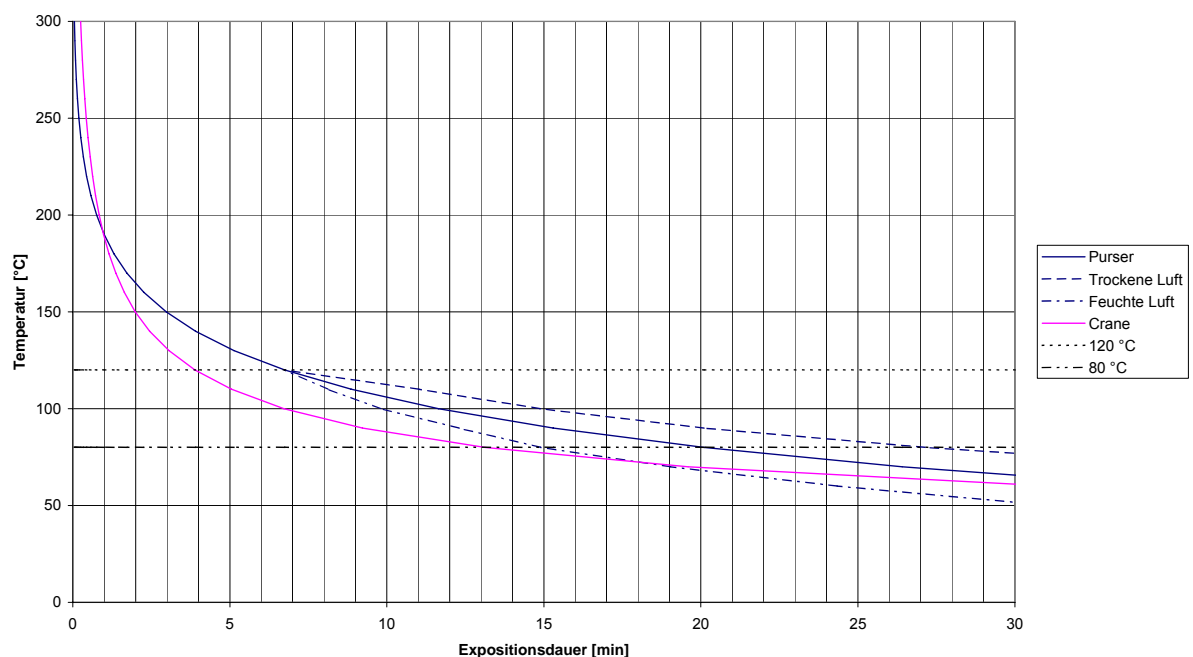
Abbildung 30: Letalitäten infolge CO- bzw. HCN-Exposition (MAY 2006)

### 3.8.2.3 Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus

Die infolge eines Brandes freigesetzte Energie kann auf den Menschen durch Wärmestrahlung oder infolge konvektiver Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelbaren Brandbereich, während durch konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche transportiert werden kann. Die damit verbundene Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Verbrennungen oder Wärmestaubbildung im menschlichen Organismus führen. Im Allgemeinen führen kurze Expositionszeiten aufgrund der körpereigenen Wärmekapazität zu keiner signifikanten Erhöhung der Körpertemperatur. Je-

doch können bereits kurze Expositionszeiten zu Verbrennungen auf der Haut und im Atemtrakt führen.

Neben der Umgebungstemperatur hat der Feuchtegehalt der Luft einen wesentlichen Einfluss auf die Art der Schädigung (siehe Abbildung 31). Nach Purser (1995) ist in trockener Luft bis zu einer Temperatur von 120°C mit überwiegender Wärmestaubildung zu rechnen. Temperaturen über 120°C führen schließlich zu Verbrennungen der Haut.



**Abbildung 31: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung**

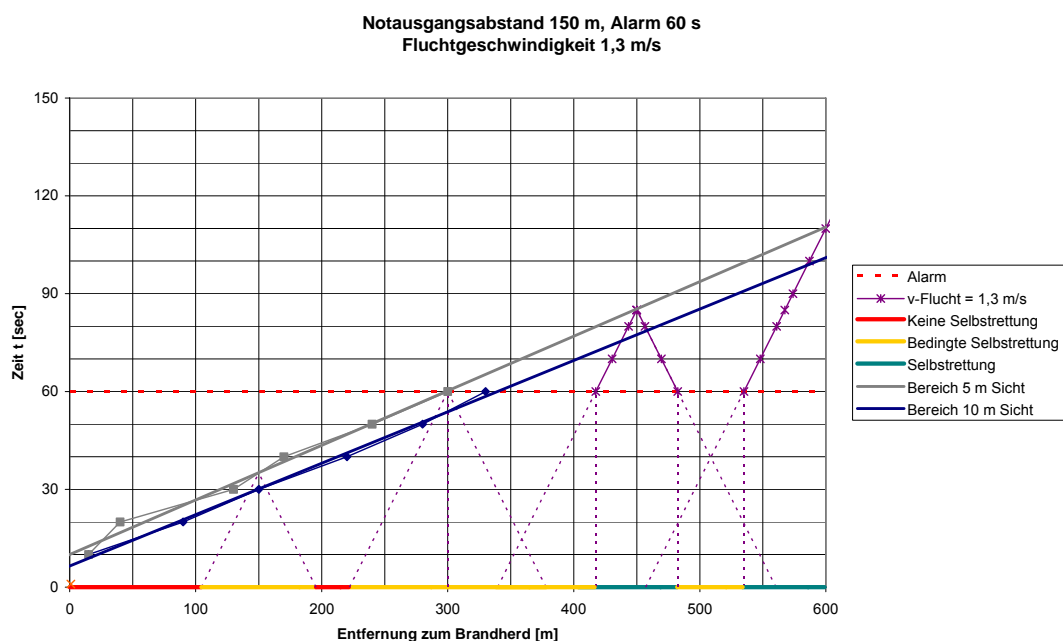
#### 3.8.2.4 Bestimmung von Selbstrettungsbereichen

Das erfolgreiche Flüchten von Tunnelnutzern im Ereignisfall in sichere Bereiche wird maßgeblich von den lokal vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. Als Maß zur Abschätzung der Fluchtbedingungen dienen Letalitätskurven für Einwirkungen infolge von Druck, Temperatur sowie Gas- und Partikelkonzentrationen. Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen Berechnungen lassen sich somit in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit und den gegebenen Fluchtweglängen Bereiche ableiten, aus denen eine erfolgreiche Selbstrettung oder nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung unter den gegebenen Randbedingungen möglich ist.

Hierzu wird für den Tunnelnutzer bei noch ausreichenden Bedingungen eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Werden Grenzwerte unterschrit-

ten, so wird davon ausgegangen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung ergeben sich aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung bezeichnet. Keine Selbstrettung ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann. Die folgende Abbildung 32 zeigt exemplarisch die Ermittlung der verschiedenen Selbstrettungsbereiche.



**Abbildung 32: Selbstrettungsbereiche (MAY 2006)**

### 3.8.2.5 Bestimmung von Personendichten

Die Bestimmung der Fahrzeugmengen wird wesentlich durch nachfolgende Faktoren beeinflusst:

- ▶ Straßentyp (Anzahl Fahrspuren/Anzahl gestauter Fahrspuren)
- ▶ Fahrzeugdichte bei mittlerem Verkehrsaufkommen (Unterscheidung Tag/Nacht)
- ▶ Mittlere Fahrzeugdichte im Stau (stehende Fahrzeugkolonne)

- ▶ Durchschnittliche Anzahl Personen pro Fahrzeug
- ▶ Detektionszeit bis Tunnelsperrung

Maßgeblichen Einfluss auf die Anzahl der potentiell betroffenen Tunnelnutzer hat hierbei die Zeit bis zur Detektion eines Unfallereignisses<sup>9</sup>, da nach der Detektion in der Regel eine sofortige Tunnelschließung erfolgt. Dadurch werden nachfolgende Verkehrsteilnehmer daran gehindert, in den Gefahrenbereich einzufahren. Die entsprechende Zeitspanne ist jedoch abhängig vom jeweiligen Unfallszenario.

Die Berechnung der Fahrzeugmengen erfolgt mit Hilfe der Theorie von kinematischen Wellen, fahrstreifenbezogen und getrennt für Bereiche mit freiem Verkehrsfluss und Stau bzw. stockendem Verkehr. Hierbei werden folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Alle Fahrzeuge fahren im flüssigen Verkehr mit der zulässigen Maximalgeschwindigkeit.
- Reaktionszeit und Bremsweg werden vernachlässigt.
- Mit Ausnahme der Detektionszeit werden keine weiteren zeitlichen Effekte berücksichtigt.

Zur Ermittlung des Ausmaßes muss zunächst die Gesamtanzahl  $P$  der sich im Tunnel befindlichen Personen bestimmt werden. Dabei müssen die folgenden Fälle unterschieden werden:

Stau

$$P = D_{\text{Stau}} \cdot l \cdot b_{\text{Fzg}} \cdot f_s$$

freier Verkehr (Tunnelsperrung erfolgreich)

$$P = Q \left( \frac{l'}{v} + t_s \right) \cdot b_{\text{Fzg}} \cdot f_s$$

freier Verkehr (Tunnelsperrung nicht erfolgreich)

mit:

$D_{\text{Stau}}$	Dichte gestauter Fahrzeuge
$l$	Länge des Tunnels
$b_{\text{Fzg}}$	Fahrzeugbesetzungsgrad

<sup>9</sup> Folgende Alarmierungsarten können u.a. zu einer Tunnelschließung führen: Erkennen des Unfalls per Videoüberwachungssystem, Alarmierung durch Tunnelbenutzer, Brandmeldekabel etc.



---

$f_s$	Anzahl Fahrspuren
$Q$	Verkehrsstärke
$v$	Geschwindigkeit der Fahrzeuge im Tunne
$t_s$	Zeit bis zur Sperrung des Tunnels
$l'$	Strecke vom Einfahrportal bis zum Brandherd

### 3.8.2.6 Schadensausmaßbestimmung

Die Bestimmung der Schadensausmaße erfolgt durch Überlagerung der nach Kapitel 3.8.2.5 ermittelten Personendichten mit den in Kapitel 3.8.2.4 bestimmten Bereichen für „Selbstrettung“, „bedingte Selbstrettung“ und „keine Selbstrettung“. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung wird zur Bestimmung der Schadensausmaße die Annahme getroffen, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

### 3.8.3 Risikoermittlung

Zur Darstellung der Risiken werden die über die Ereignisbäume ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und das jeweils zugehörige Schadensausmaß nach der Größe des Ausmaßes sortiert und als Summenhäufigkeiten in H-A-Diagrammen aufgetragen. Dadurch lassen sich ermittelte Risiken in vergleichbarer Form darstellen. In Abbildung 33 ist beispielhaft der Verlauf von Risiken in Abhängigkeit von kompensatorischen Maßnahmen dargestellt.

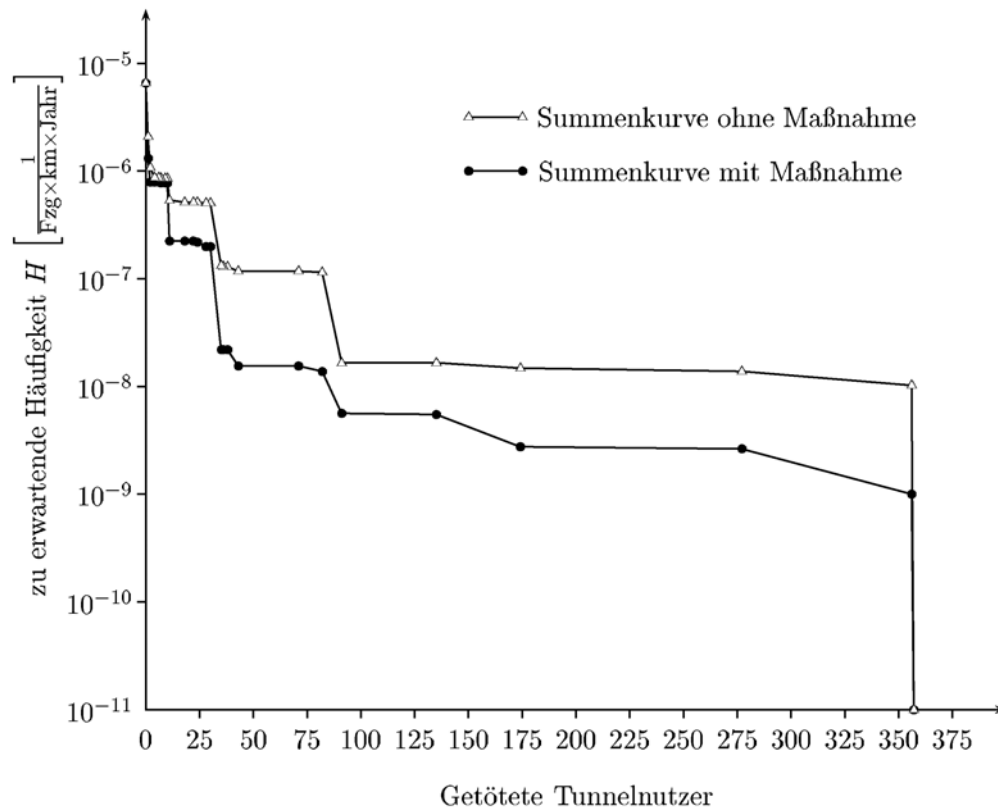


Abbildung 33: Beispiel eines H-A-Diagramms [MAY 2003a]

### 3.9 Untersuchungsergebnisse

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

#### 3.9.1 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 Kollision, Brand infolge Kollision sowie Brand infolge Selbstzündung unterschieden. Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben. In nachfolgender Tabelle 9 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. Die eingesetzten Werte basieren auf dem Forschungsbericht Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln (FE 03.0378/2004/FRB). Die Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrten beträgt $2,28 \cdot 10^{-7}$ [1 / Fahrzeug*km]. Diese wird daher für die Tunnelröhren des Referenz- und Untersuchungsfalles herangezogen.

Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	Der eingesetzte Wert basiert auf den im FE 03.378/2004/FRB angegebenen Werten zur Brandwahrscheinlichkeit infolge eines Unfalls. Es wird angenommen, dass in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist

Initialereignis (Top Event)		Beschreibung
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert auf Grundlage der im FE 03.0378/2004/FRB hergeleiteten Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1 / Fahrzeug*km].

Tabelle 9: Häufigkeiten  $H_0$ 

### 3.9.2 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.

#### 3.9.2.1 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)
- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehrsfluss / Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Tunnelsperrung/Alarmierung erfolgreich (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Erhöhtes Ausmaß (Reisebus ja / nein)

Die zur Bestimmung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände erforderlichen Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisablaufes werden in nachfolgender Tabelle 10 näher erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung
[1]	5 MW / 30 MW / 100 MW	Für den Tunnel Elbquerung A 20 wird in der Verkehrsuntersuchung ein Lkw-Anteil von 16,28% ausgewiesen. Aufgrund der Verkehrszusammensetzung ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von 83,7 : 15,7 : 0,06, 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.
[2]	Tageszeit Tag/Nacht	Das Verkehrsaufkommen ist tageszeitabhängig. Der Zeitpunkt eines Brandes hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Als Tageszeit werden die Stunden mit hoher Verkehrsdichte von 06.00 bis 22.00 Uhr betrachtet, als Nachtzeit die Stunden von 22.00 bis 06.00 Uhr. Bezogen auf 24 h entspricht hierbei der Anteil der Stunden bei Tag 67% und der Anteil der Stunden bei Nacht 33%.
[3]	Verkehrszustand Freier Verkehr / Stau	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. Da es sich bei dem Untersuchungstunnel um einen Überlandtunnel mit geringer Stauneigung handelt, wird die Annahme getroffen, dass Stau im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 %, d.h. in ca. 30 h /Jahr, eintritt.
[4]	Detektion Ja / Nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99% innerhalb von 60 s erfolgt.
[5]	Tunnelsperrung Ja / Nein	Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führt unter Umständen dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird (im Sinne einer konservativen Annahme) davon ausgegangen, dass dies in einem von hundert Fällen eintritt.
[6]	Lüftungssystem Ja / Nein	Die Belüftung der Tunnel erfolgt im Fall des Längslüftungsbetriebs ausschließlich über Strahlventilatoren und im Rauchabsaugbetrieb mittels einzeln ansteuerbaren Rauchabsaugvorrichtungen. Nach erfolgter Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Es wird die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1%) das Aktivieren des entsprechenden Lüftungsprogramms nicht erfolgt.
[7]	Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadenausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1% der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes wird, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal eine Menge von 20 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.

**Tabelle 10: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes**

### 3.9.2.2 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 11 gibt die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für den Tunnel Elbquerung A 20 in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensausmaß wieder. Durch das Fehlen von Zu- oder Abfahrten fehlt dort der Unfalltyp 3.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung		
[1] Unfalltyp	Basierend auf dem Forschungsbericht Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln (FE 03.0378/2004/FRB). wird für den Tunnel Elbquerung A 20 von folgender Verteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
		Referenz-tunnel	Untersuchungstunnel
	Unfalltyp 1	12,8 %	12,8 %
	Unfalltyp 3	0,0 %	0,0 %
	Unfalltyp 6	78,5 %	78,5 %
	Unfalltyp 7	8,7 %	8,7 %
[2] Ausmaßverteilung	Gemäß FE 03.0378/2004/FRB wird von folgender Schadensausmaßverteilung nach Unfalltypen ausgegangen:		
	Unfalltyp 1	99,25 %	Keine Todesopfer
		0,59 %	1 Todesopfer
		0,15 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 3	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42	1 Todesopfer
		0,07	2-3 Todesopfer
		0,01	4-9 Todesopfer
		0,0001	10-30 Todesopfer
		0,00001	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 6	99,00	Keine Todesopfer
		0,72	1 Todesopfer
		0,27	2-3 Todesopfer
		0,01	4-9 Todesopfer
		0,0001	10-30 Todesopfer
		0,00001	>30 Todesopfer
	Unfalltyp 7	99,50 %	Keine Todesopfer
		0,42	1 Todesopfer
		0,07	2-3 Todesopfer
		0,01	4-9 Todesopfer
		0,0001	10-30 Todesopfer
		0,00001	>30 Todesopfer

Tabelle 11: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision

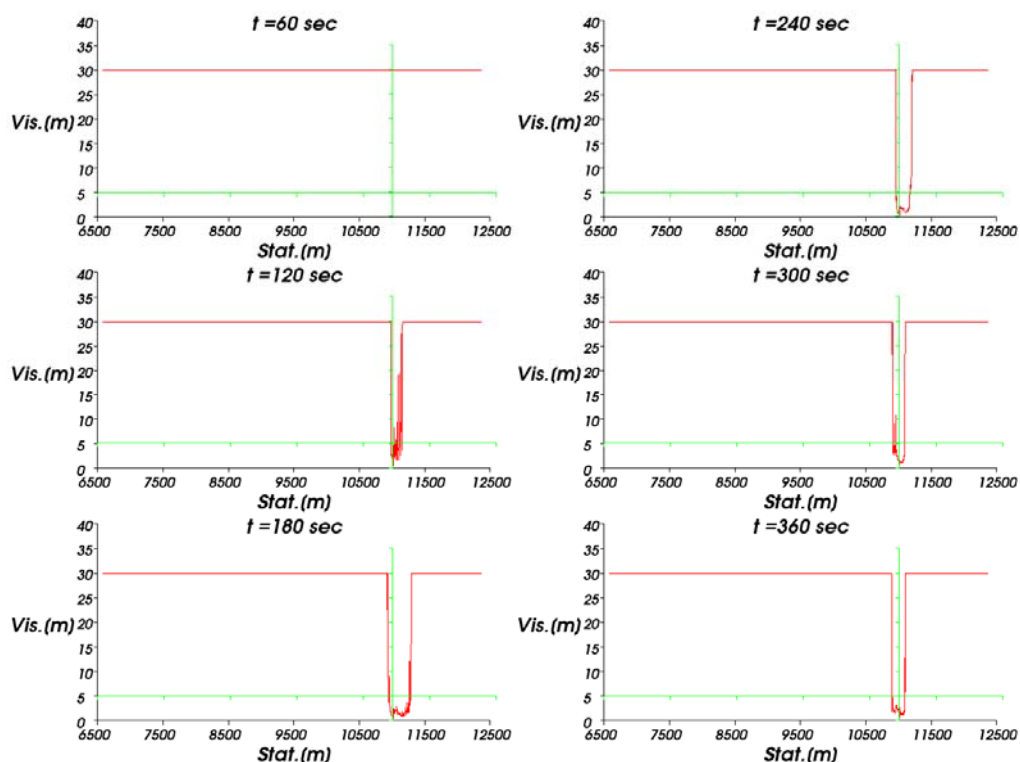
### 3.9.3 Ausmaßabschätzung

Bei der Ermittlung von Schadensausmaßen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Wirkungsmechanismen zu unterscheiden zwischen Schadensausmaßen infolge Brand und infolge Kollision.

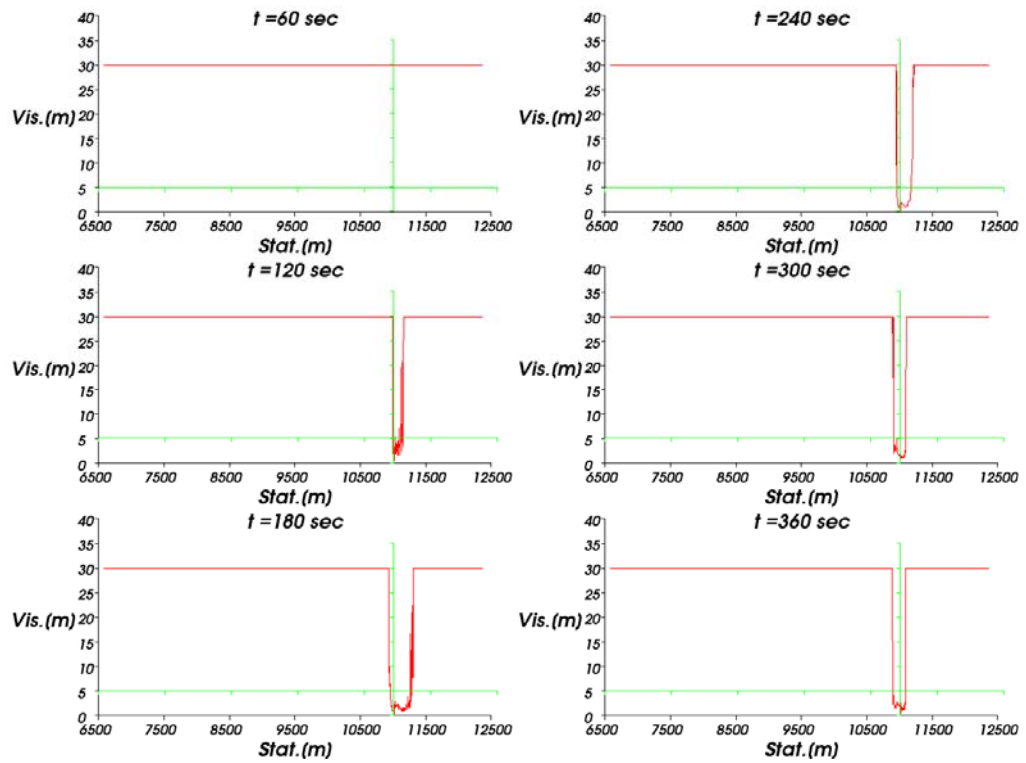
### 3.9.3.1 Schadensausmaße infolge Brand

Auf ihrer Flucht werden Tunnelnutzer im Wesentlichen durch den Einfluss von 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 (MAY 2006). Zur Abschätzung der jeweiligen Schadensausmaße wird daher der in Kapitel 3.8.2.1 vorgestellte 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.

In Abbildung 34 bis Abbildung 36 sind exemplarisch die sich infolge eines 30 MW-Brandes ergebenden Sichtweiten für die Oströhren des Referenz- und des Untersuchungstunnels für im Stauffall bei aktivierter Brandlüftung dargestellt. Dabei ist die stärkere Begrenzung der Rauchausbreitung für den Planfall 1 (verkürzte Detektion) deutlich zu erkennen.

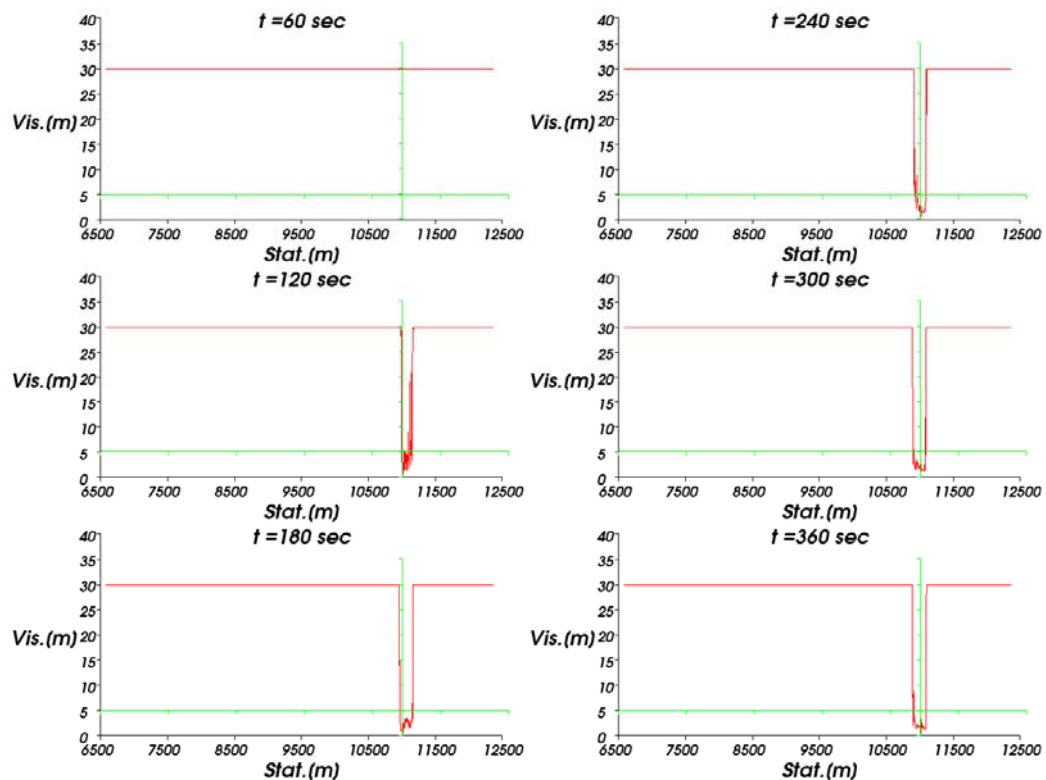


**Abbildung 34: Berechnete Sichtweiten in 2,0 m Höhe infolge 30 MW - Brand, Referenztunnel, Oströhre, Stau**



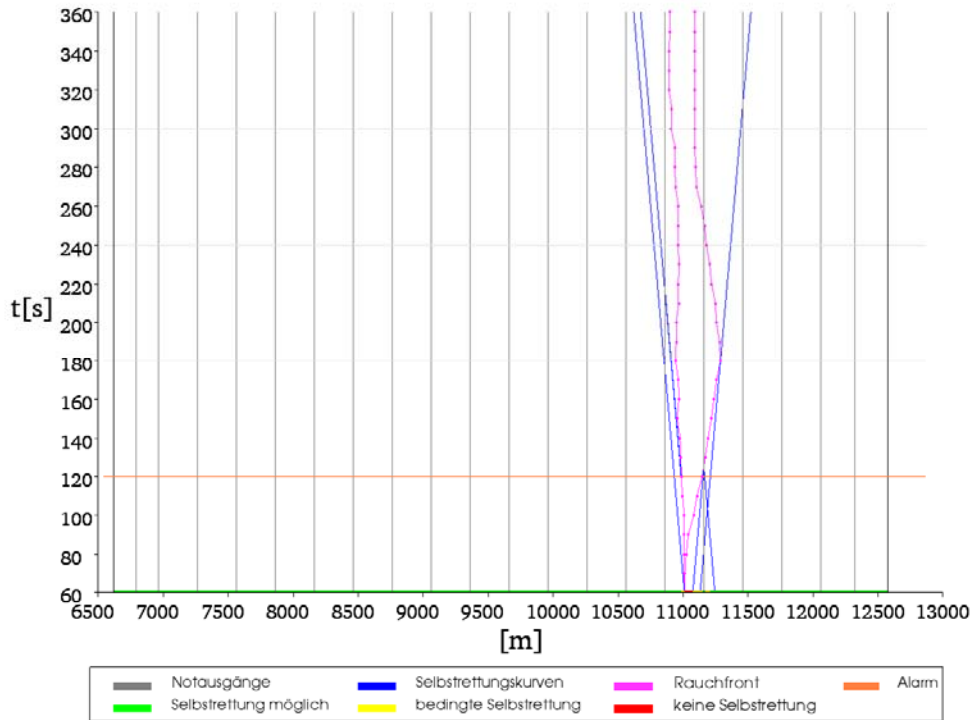
**Abbildung 35: Berechnete Sichtweiten in 2,0 m Höhe infolge 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel, Oströhre, Stau**



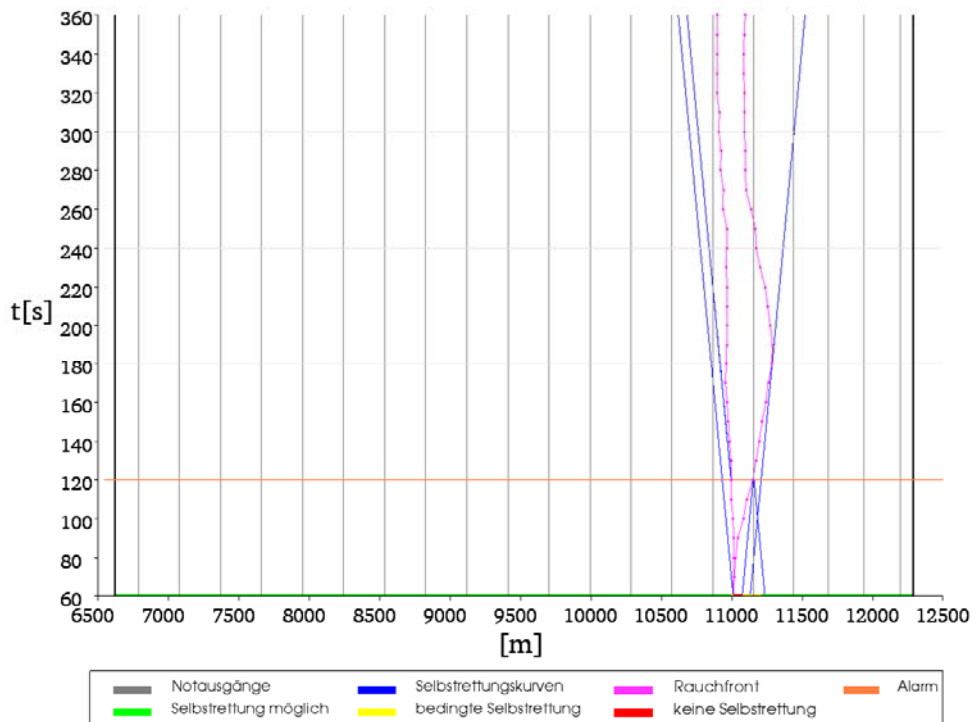


**Abbildung 36: Berechnete Sichtweiten in 2,0 m Höhe infolge 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel (Planfall 1), Oströhre, Stau**

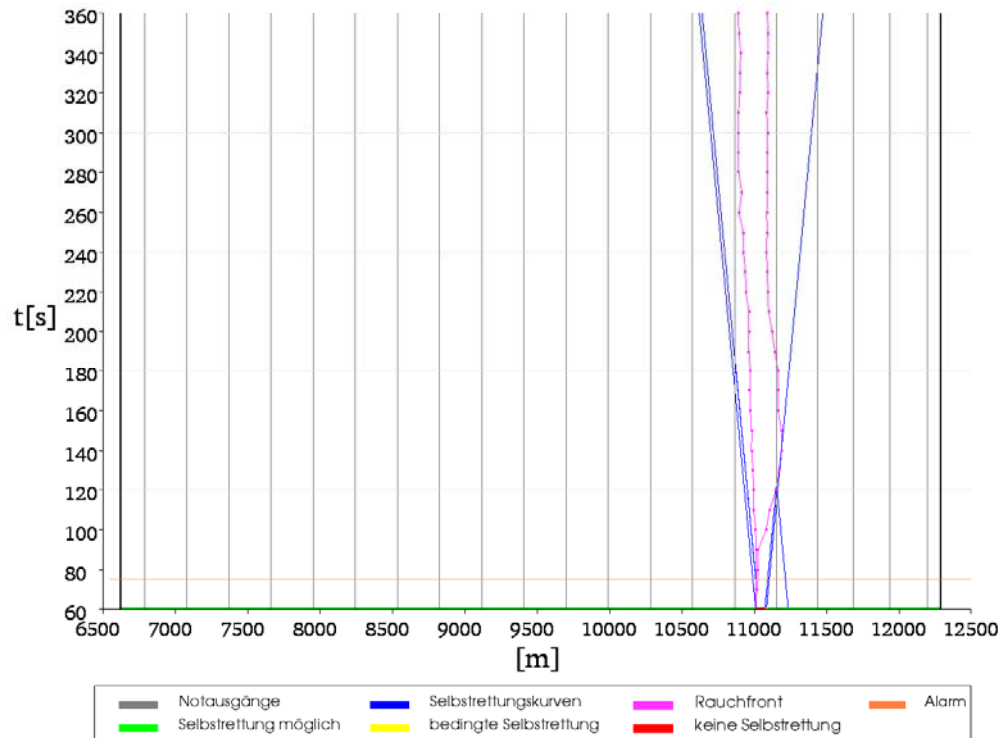
In Abbildung 37 bis Abbildung 39 sind die zugehörigen Selbstrettungsbereiche dargestellt. Dabei wird in allen Fällen der positive Einfluss der Rauchabsaugung auf das Sicherheitsniveau aufgrund der Begrenzung der Ausbreitung der Rauchfronten deutlich. Dieser Effekt kann bei allen Brandlasten in allen Röhren sowohl im Untersuchungs- als auch im Referenzfall beobachtet werden (siehe Anhang). Die auf 300 m<sup>3</sup>/s ausgelegte Rauchabsaugung ist in allen Szenarien in der Lage, eine Brandlast von bis zu 100 MW auf den Absaugbereich von ca. 250 m zu begrenzen. Besonders begünstigend wirkt sie sich bei verkürzter Detektion aus. Die Rauchausbreitung ist hier noch nicht so weit vorangeschritten, so dass die schädlichen Gase frühzeitig auf den Bereich der geöffneten Rauchklappen begrenzt werden können.



**Abbildung 37: Selbststrettungsbereiche infolge. 30 MW - Brand, Referenztunnel, Oströhre, Stau**



**Abbildung 38: Selbststrettungsbereiche infolge. 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel (Nullfall), Oströhre, Stau**



**Abbildung 39: Selbstrettungsbereiche infolge 30 MW - Brand, Untersuchungstunnel (Planfall 1), Oströhre, Stau**

Sämtliche weiteren Untersuchungsszenarien sind im Anhang dokumentiert.

Über die Verknüpfung mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich nach den hier ermittelten Selbstrettungsbereichen anschließend für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenzahlen bestimmen.

### 3.9.3.2 Schadensausmaße infolge Kollision

Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird auf Grundlage des im FE 03.0378/2004/FRB vorgegebenen Zusammenhangs gemäß nachfolgender Tabelle 12 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

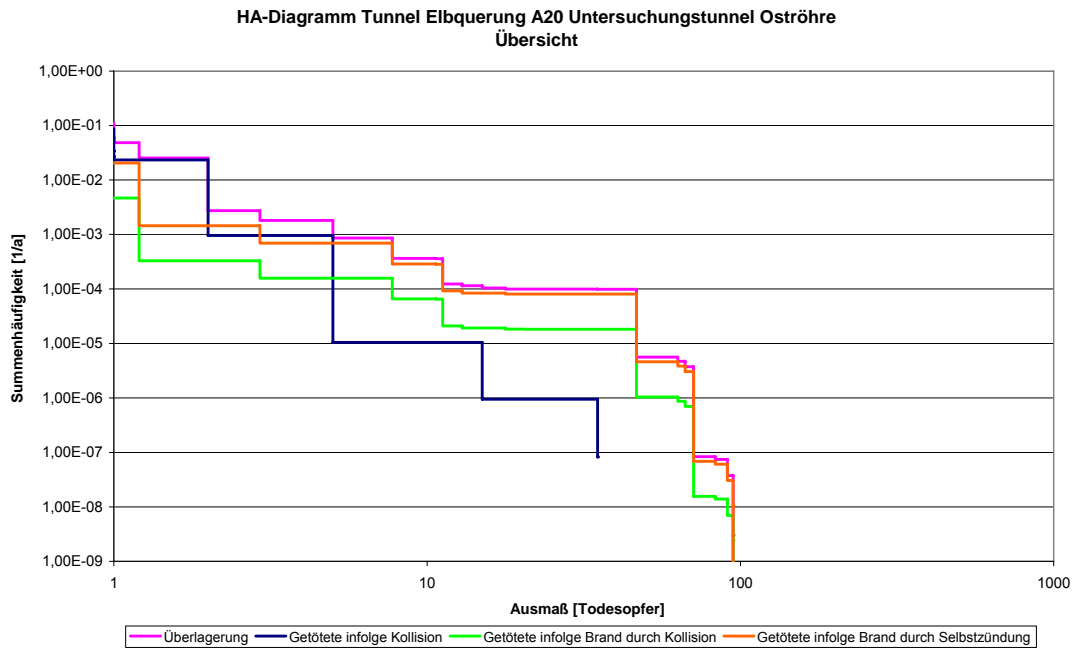
**Tabelle 12: Schadensausmaße infolge Kollision**

### 3.9.4 Risikoermittlung (H-A-Diagramm)

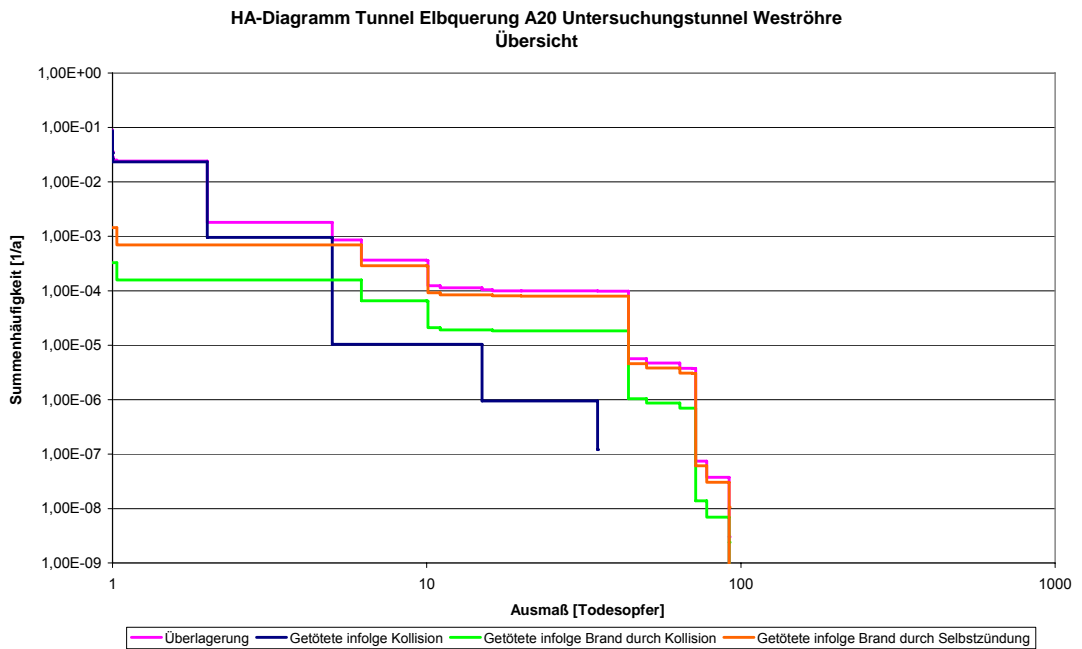
Zur Bestimmung und Darstellung der Risiken werden die in den vorausgehenden Kapiteln 3.9.1 und 3.9.2 ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und die jeweils zugehörigen Schadensausmaße nach Kapitel 3.9.3 zunächst getrennt für das jeweilige Initialereignis nach der Größe der Schadensausmaße sortiert, und als Summenhäufigkeiten in einem HA-Diagramm aufgetragen. In einem zweiten Schritt werden die so ermittelten Einzelergebnisse miteinander überlagert, um das Gesamtrisiko zu erhalten. Im Folgenden werden die Ergebnisse in aggregierter Form dargestellt. Eine Zusammenstellung sämtlicher Einzelergebnisse ist im Anhang enthalten.

In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung als Summenhäufigkeitslinien getrennt nach Fahrtrichtungen für die Ost- und die Weströhre dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass im Bereich der Oströhre ein höheres Gefährdungspotential vorliegt. Sowohl die Eintrittshäufigkeit als auch das Ausmaß sind in der Weströhre geringer.

Aufgrund der Annahme, dass im Tunnelbereich eine Stausituation nur während 30 h im Jahr auftritt, liegt in über 99% der Zeit im Tunnel freier Verkehr vor. Dabei wird durch die Kolbenwirkung der Fahrzeuge eine genügend große Eigengrundströmung im Tunnel aufgebaut, so dass keine zusätzliche mechanische Längsventilation notwendig ist.



**Abbildung 40: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Nord (Oströhre), Nullfall**



**Abbildung 41: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Süd (Weströhre); Nullfall**

In Abbildung 42 und Abbildung 43 werden der Referenz- und der Nullfall (Untersuchungstunnel) einander vergleichend gegenüber gestellt. Die Ergebnisse der Häu-

figkeitsausmaßermittlung infolge Kollision und Brand sind überlagert dargestellt. Sie repräsentieren somit das zu erwartende Gesamtrisiko pro Tunnelröhre.

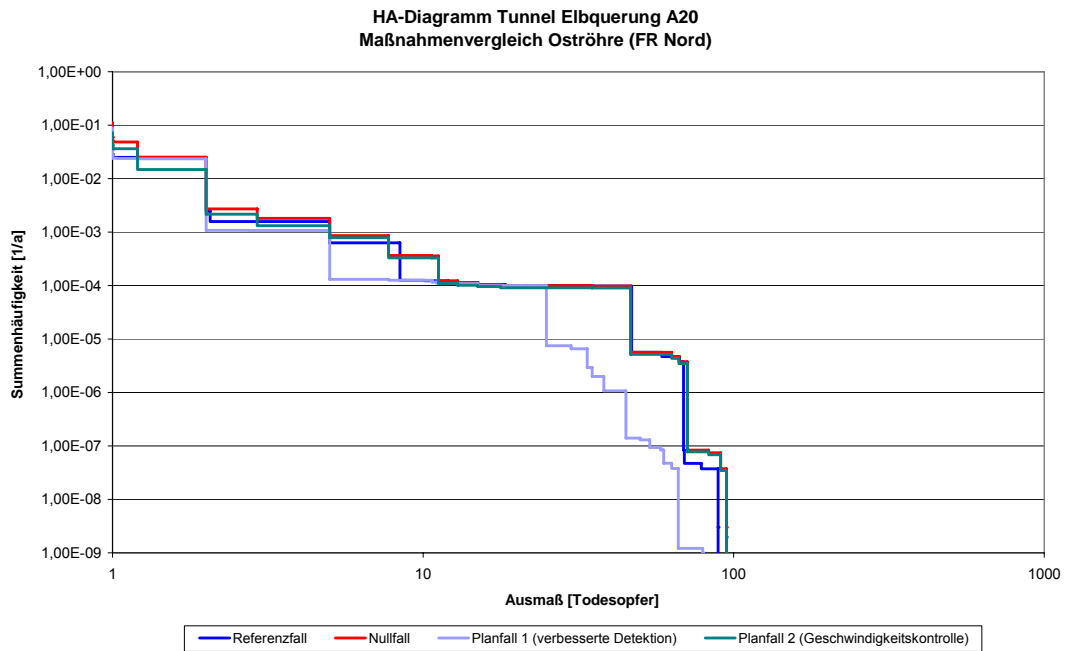


Abbildung 42: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Nord (Oströhre)

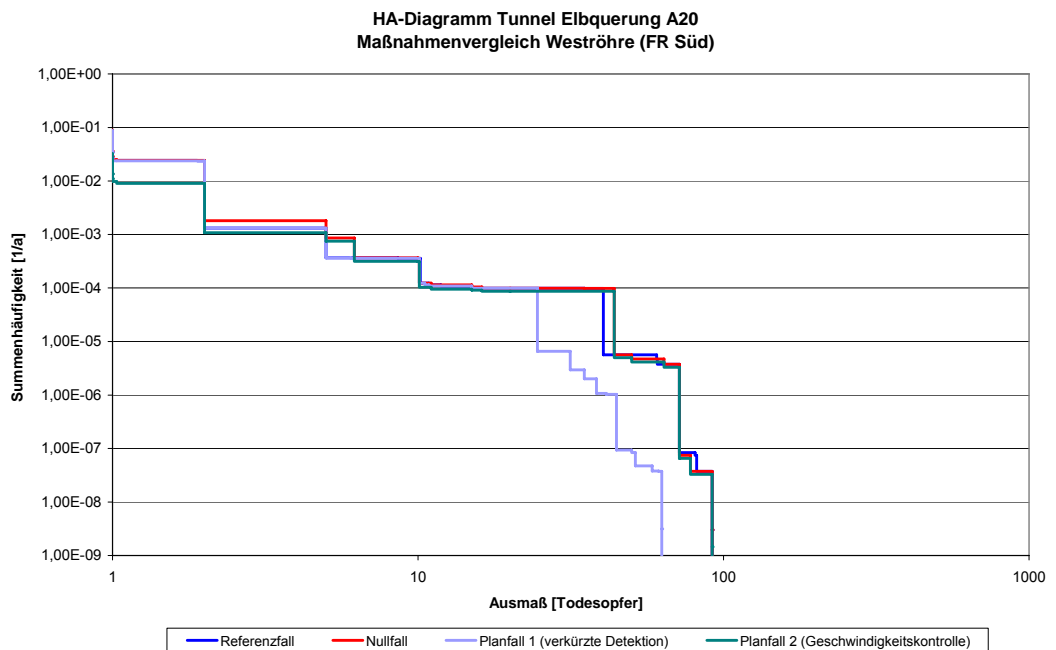


Abbildung 43: HA-Diagramm für Fahrtrichtung Süd (Weströhre)

Es ist zu erkennen, dass für die Tunnelröhren des Nullfalls durch die nicht RABT - konforme Nordrampe bei einem im Vergleich zum Referenzfall ein geringeres Sicherheitsniveau erzielt wird. Die Planfälle weisen demgegenüber verbesserte Risikowerte auf.

### 3.9.5 Risikowerte

Als Entscheidungsgrundlage werden nachfolgend die Risiken bestimmt. Als Maß für das Risiko dient die Fläche unter den Summenhäufigkeitskurven  $h(x)$  der f-n-Diagramme und wird über nachfolgendes Integral berechnet.

$$R = \int h(x)dx$$

In Tabelle 13 und Tabelle 14 sind die sich ergebenden Risikowerte für die einzelnen Fälle getrennt für Ost- und Weströhre aufgeführt. Als Bezugspunkt ist der Referenzfall, also ein richtliniengerecht ausgestatteter Tunnel dargestellt. Negative bzw. rote Werte bedeuten, dass die jeweilige Untersuchungsvariante ein niedrigeres Sicherheitsniveau gegenüber diesem Bezugsfall aufweist. Positive bzw. grüne Werte bedeuten dagegen ein höheres Sicherheitsniveau.

Die ermittelten Risikowerte spiegeln die bereits in den HA-Diagrammen zum Ausdruck gekommene Reihung hinsichtlich des Sicherheitsniveaus wieder. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu beachten, dass bei der Bildung des Risikowertes große Schadensausmaße mit geringer Eintrittshäufigkeit eher unterrepräsentiert werden, da kleine Schadensausmaße mit einer großen Eintrittshäufigkeit den Endwert stärker beeinflussen. Zur Transparenz des Gesamtergebnisses werden die Risikowerte zunächst getrennt für die Initialereignisse Brand (geringe Eintrittshäufigkeit) und Kollision (hohe Eintrittshäufigkeit) ausgewiesen, bevor sie zu einem gemeinsamen Risikowert aggregiert werden.

Unter Einbezug des Aversionsfaktors (siehe Kapitel 3.8) wird daraus das bewertete kollektive Risiko gebildet, das gemäß dem Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ das bewertete Tunnelrisiko beschreibt. Durch die vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte in Tabelle 13 und Tabelle 14 lassen sich die untersuchten Fälle hinsichtlich des erzielbaren Sicherheitsniveaus differenzieren.

Im Brandnahbereich liegen die Notausgänge im Untersuchungsfall ca. 290 m und im Referenzfall 300 m auseinander. Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen

den Notausgangsabständen ist hierdurch kein signifikanter Einfluss auf das Sicherheitsniveau nachweisbar.

Der verbleibende relevante Unterschied zwischen Referenz- und Untersuchungsfall ist durch die unterschiedliche Längsneigung der Nordrampe gegeben. Die um knapp 1 % größere Längsneigung im Untersuchungsfall bewirkt in Richtung des Nordportals eine schnellere Rauchverbreitung durch die stärkere Kaminwirkung.

Somit ergibt sich für den Untersuchungstunnel Oströhre (Nullfall) der um ca. 21 % schlechtere Risikowert im Vergleich zum RABT – konformen Referenzstunnel.

Für die Weströhre (Nullfall) wirkt sich die steilere Nordrampe kaum auf die Sicherheit der Tunnelnutzer aus, da sich die Rauchgase hauptsächlich in Fahrtrichtung ausbreiten. Wie aus Tabelle 14 hervorgeht, weist die Untersuchungsvariante 1 der Weströhre ein - verglichen mit dem Referenzfall - um etwa 5 % schlechteres Sicherheitsniveau auf.

Die im Planfall 1 vorgenommene verkürzte Detektionszeit bewirkt ein um ca. 18 % (Oströhre) bzw. knapp 10 % (Weströhre) höheres Sicherheitsniveau. Bereits zu Beginn des Brandes mit relativ geringer Brandlast wird hier das Brandprogramm aktiviert und die Tunnelnutzer zur Flucht aufgefordert, so dass sich weniger Betroffene ergeben.

Die im Planfall 2 angesetzte Geschwindigkeitskontrolle wirkt sich positiv auf die Unfalleintrittswahrscheinlichkeit aus und damit auch auf das Gesamtrisiko. Hier ergeben sich Erhöhungen des Sicherheitsniveaus von ca. 15 % für die Oströhre bzw. 49% für die Weströhre.

Vergleicht man die beiden Röhren im Nullfall miteinander, so weist die Oströhre ein geringeres Sicherheitsniveau als die Weströhre auf. Laut Lüftungsgutachten ergibt sich im Fall von freiem Verkehr in Fahrtrichtung Süden ein höherer Druckanteil durch die noch ausfahrenden Fahrzeuge. Deswegen bewirkt in der Brandfrühphase die Längsströmungsgeschwindigkeit bis zum Abklingen der fahrzeuginduzierten Längsströmung einen verbesserten Rauchabtrieb in den Tunnelbereich, in dem die Fahrzeuge frei abfahren können und reduziert somit die Gefahr und damit auch das Risiko für die Tunnelnutzer.



		infolge Kollision	infolge Brand durch Kollision	infolge Brand durch Selbstzündung	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0.139	0.009	0.040	0.188
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0.139	0.016	0.072	0.228
	Vergleich zum Referenzfall	0.0%	-81.8%	-81.8%	-21.3%
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	0.139	0.003	0.012	0.154
	Vergleich zum Referenzfall	0.0%	69.3%	69.3%	18.0%
Untersuchungstunnel (Planfall 2) Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	0.078	0.009	0.072	0.160
	Vergleich zum Referenzfall	43.7%	-2.4%	-81.8%	14.9%

Tabelle 13: Risikowerte der Oströhre

		infolge Kollision	infolge Brand durch Kollision	infolge Brand durch Selbstzündung	gesamt
Referenzunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	0.139	0.007	0.032	0.178
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	0.139	0.009	0.039	0.187
	Vergleich zum Referenzfall	0.0%	-22.0%	-22.0%	-4.8%
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	0.139	0.004	0.018	0.161
	Vergleich zum Referenzfall	0.0%	43.7%	43.7%	9.6%
Untersuchungstunnel (Planfall 2) Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	0.049	0.003	0.039	0.091
	Vergleich zum Referenzfall	64.8%	57.0%	-22.0%	49.0%

Tabelle 14: Risikowerte der Weströhre

### 3.9.6 Kostenwirksamkeit

Die Bestimmung der Kostenwirksamkeit erfolgt mit Hilfe eines Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses. Nutzenkomponenten ergeben sich hierbei aus der Veränderung der monetarisierten Risiken sowie der eingesparten Kosten gegenüber dem Referenzfall. Der Monetarisierung der Risiken liegen folgende Grenzkosten pro gerettetes Menschenleben nach FE 03.378/2004/FRB zugrunde:

- ▶ 5 Mio. € infolge von Kollisionen
- ▶ 10 Mio. € infolge von Tunnelbränden

Die Kostenkomponenten setzen sich zusammen aus den jährlich zu erwartenden Investitions- und Betriebskosten. Herangezogen werden dabei ausschließlich die Kosten, die direkt für die Maßnahmen eingesetzt werden müssen. Für die verkürzte Detektion werden pro Tunnelröhre dabei 250.000 € veranschlagt. Für die Geschwindigkeitskontrolle je 200.000 €.

Grundlage hierzu bilden die planfallspezifisch ermittelten Investitionskosten (siehe Anhang), die unter Berücksichtigung einer Abschreibungsdauer von 10 Jahren für die technische Ausstattung und einer Diskontrate von  $p=3\%$  in jährliche Investitionskosten überführt werden<sup>10</sup>. Die zu erwartenden jährlichen Betriebskosten werden mit 10% der jährlichen Investitionskosten abgeschätzt. Die zu erwartenden Jahreskosten berechnen sich über nachfolgenden Zusammenhang:

$$K_{\text{Jahr}} = K_{\text{Invest}} \cdot \frac{(1+p)^{dq} \cdot p}{(1+p)^{dq} - 1} + K_{\text{Betrieb}}$$

$$= 1,1 \cdot K_{\text{Invest}} \cdot \frac{(1+p)^{dq} \cdot p}{(1+p)^{dq} - 1}$$

Mit:

$K_{\text{Jahr}}$ : Jahreskosten [€/a]

$K_{\text{Invest}}$ : Investitionskosten [€]

$K_{\text{Betrieb}}$ : Betriebskosten [€/a]

$dq$ : Abschreibungszeitraum [a]

$p$ : Diskontrate [%]

<sup>10</sup> gemäß[EWS 1997] Tabelle 14

Mit Bezug auf den Referenzfall ergibt sich die Kostenwirksamkeit infolge Brand zu

$$KW_{\text{Kollision}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Kollision}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}}$$

$$KW_{\text{Brand}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Brand}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}},$$

bzw. infolge Brand und Kollision zu

$$KW_{\text{Brand+Kollision}} = \frac{\Delta R_{m,\text{Kollision}} + \Delta R_{m,\text{Brand}}}{K_{\text{Jahr,Planfall}}}.$$

Mit:

$$\Delta R_{m,\text{Kollision}} = R_{m,\text{Kollision,Nullfall}} - R_{m,\text{Kollision,Planfall}}$$

$$\Delta R_{m,\text{Brand}} = R_{m,\text{Brand,Nullfall}} - R_{m,\text{Brand,Planfall}}$$

$K_{\text{Jahr, Planfall}}$ : Jährliche Investitionskosten für eine Maßnahme

$R_m$ : Monetarisiertes Risiko

Die nachfolgende Tabelle 15 listet die jährlichen Kosten für die Maßnahmen des Planfalls 1 und 2 auf:

Kostenberechnung	Investitionskosten	Jährliche Investitionskosten	Jährliche Betriebskosten	Jährliche Gesamtkosten
Verkürzte Detektion (Planfall 1)	250.000 €	29.308 €	2.931 €	32.239 €
Geschwindigkeitsüberwachung (Planfall 2)	200.000 €	23.446 €	2.345 €	25.791 €

**Tabelle 15: Jährliche Gesamtkosten der Maßnahmen pro Tunnelröhre**

Tabelle 16 und Tabelle 17 geben abschließend das Kostenwirksamkeits-Verhältnis wieder. Dabei gilt:

$$\text{Kosten – Wirksamkeits – Verhältnis} = \frac{K_{\text{Jahr}}}{\Delta R_m}$$

Je geringer der hierbei ermittelte Wert, desto wirksamer ist die Maßnahme

	Risikowert [GT/a]	jährliche Mehrkosten	monetarisierte Risiken [€/Jahr]			Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis		
			infolge Kollision	infolge Brand	gesamt	infolge Kollision	infolge Brand	gesamt
Referenztunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	--	694.500 €	489.000 €	1.183.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	--	694.500 €	889.000 €	1.583.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	32.238 €	694.500 €	150.000 €	844.500 €	ohne Wirkung	0,044	0,044
Untersuchungstunnel (Planfall 2) stationäre Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	25.791 €	391.000 €	817.000 €	1.208.000 €	0,085	0,358	0,069

**Tabelle 16: Kostenwirksamkeit der Planfälle für die Oströhre**

	Risikowert [GT/a]	jährliche Mehrkosten	monetarisierte Risiken [€/Jahr]			Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis		
			infolge Kollision	infolge Brand	gesamt	infolge Kollision	infolge Brand	gesamt
Referenztunnel nach RABT	Risikowert [GT/a]	--	694.500 €	391.000 €	1.085.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Nullfall)	Risikowert [GT/a]	--	694.500 €	477.000 €	1.171.500 €	--	--	--
Untersuchungstunnel (Planfall 1) verkürzte Detektion	Risikowert [GT/a]	32.238 €	694.500 €	220.000 €	914.500 €	ohne Wirkung	0,125	0,125
Untersuchungstunnel (Planfall 2) stationäre Geschwindigkeitskontrolle	Risikowert [GT/a]	25.791 €	244.500 €	420.000 €	664.500 €	0,057	0,452	0,051

**Tabelle 17: Kostenwirksamkeit der Planfälle für die Weströhre**

Durch die vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte in Verbindung mit der Betrachtung der zugehörigen Kostenwirksamkeit lassen sich die untersuchten Fälle hinsichtlich des erzielbaren Sicherheitsniveaus sowie der Kosteneffizienz differenzieren und eine Priorisierung vornehmen.

Im Vergleich zwischen Untersuchungstunnel (Nullfall) und dem Referenzstunnel wird für den Referenzstunnel ein höheres Sicherheitsniveau erreicht. Durch das gleiche Brandventilationskonzept mit Rauchabsaugklappen und annähernd vergleichbarer Anordnung der Notausgänge unterscheiden sich beide Tunnel nur durch die Gradienten im Bereich der Rampe. Die stärkere Kaminwirkung infolge der größeren Längsneigung führt im Nullfall bis zur Aktivierung des Brandprogramms zu einem größeren Gefährdungspotential.

Eine Verkürzung der Detektionszeit, wie sie durch moderne Systeme erreichbar sind, ermöglicht deutliche Sicherheitsgewinne. Eine schnellere Aktivierung der Sicherheitssysteme und Alarmierung der Tunnelnutzer verringern die Schadensausmaße signifikant. Sowohl der Risikowert als auch die Kostenwirksamkeit weisen deutlich bessere Werte auf als der Referenzfall. Entsprechendes gilt auch für die Geschwindigkeitskontrolle, die zu einer Angleichung der Relativgeschwindigkeiten führt. Die bewirkt eine Verkehrsharmonisierung, die sich in verringerten Unfallraten niederschlägt. Für beide Maßnahmen sind verglichen mit den einzusetzenden Kosten deutliche Verbesserungen des Sicherheitsniveaus zu erreichen. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis ist daher günstig und beide Maßnahmen sind von diesem Aspekt betrachtet sinnvoll.

### **3.10 Zusammenfassung und Fazit**

Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass der Tunnel Elbquerung A 20 ohne zusätzliche Maßnahmen im Vergleich zu einem nach RABT ausgestatteten Referenzstunnel ein niedrigeres Sicherheitsniveau aufweist. Während die Weströhre das Sicherheitsniveau des Referenzfalls nur geringfügig unterschreitet, sind im Fall der Oströhre signifikante Unterschreitungen zu verzeichnen. Um ein Sicherheitsniveau entsprechend den Vorgaben nach RABT gewährleisten zu können, werden zur Risikokompensation weitere Maßnahmen erforderlich.

Als Maßnahmen zur Reduzierung der Risiken wurden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung eine Verkürzung der Detektionszeiten (Planfall 1) sowie die Installation einer stationären Geschwindigkeitsüberwachungsanlage (Planfall 2) be-

trachtet. Für beide untersuchten Maßnahmen konnte eine deutliche Verbesserung des Sicherheitsniveaus nachgewiesen werden.

Die Bestimmung des jeweiligen Sicherheitsniveaus erfolgte mittels einer quantitativen Risikoanalyse. Hierbei wurden sowohl Schadensausmaße als auch deren Eintrittswahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Als Maß für die Sicherheit diente das Risiko, das aus der Verknüpfung der Eintrittswahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen resultiert.

Die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgte mit Hilfe von Ereignisbäumen (Event Trees), in denen ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Top Event) sämtliche mögliche Ablaufvarianten bis zu einem Endzustand abgebildet wurden.

Die Eintrittshäufigkeit für das Top Event „Unfall“ wurde über Unfallkenngößen ermittelt.

Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum wurde auf Basis von statistischen Daten vorgenommen. Durch die Verknüpfung der Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten konnte schließlich die zu erwartende Häufigkeit eines Endzustandes berechnet werden.

Das Schadensausmaß zu den jeweiligen Endzuständen wurde im Fall der Kollisionen ohne Brand über unfalltypabhängige Schadensausmaßverteilungen und für die Brandfälle mittels Simulationsrechnungen ermittelt. Für die Durchführung der Simulationsrechnungen wurde der Tunnel Elbquerung A 20 über seine gesamte Länge einschließlich des strömungsmechanisch erforderlichen Nahbereichs modelliert. Die numerischen Berechnungen erfolgten in drei Raumdimensionen durch Lösen der zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung. Dadurch ließen sich Aussagen zu den Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum treffen.

Zur Bestimmung der jeweiligen Schadensausmaße wurden gemäß RABT Brandleistungen von 5 MW, 30 MW und 100 MW für einen Pkw-Brand, Bus-/Lkw-Brand bzw. Lkw -Brand zugrunde gelegt.

Insgesamt waren 72 CFD-Berechnungen erforderlich, damit für die verschiedenen Untersuchungsszenarien entsprechende Ausmaßabschätzungen durchgeführt werden konnten. Dies entsprach bei der gewählten Gitterweite mit einer durchschnittlichen Rechenzeit von ca. 120 h pro Rechenlauf einer Gesamt-Rechenzeit von ca. 8.640 Simulationsstunden. Die Berechnungen erfolgten durch paralleles Rechnen auf einem aus 8 Quad-Core und 4 Dual-Core PCs bestehenden Re-

chencluster. Je Simulationslauf wurde ein Datenvolumen von ca. 120,0 GB (Giga-Byte) generiert. Insgesamt entstand somit ein Datenvolumen von 8,6 TB.

Die überlagerten Ereignisbäume wiesen je Untersuchungsvariante 2.304 Endzustände auf, für die einzeln die zugehörigen Eintrittshäufigkeiten sowie das jeweilige Schadensausmaß ermittelt werden mussten. Verzweigungspunkte bildeten hierbei die Brandleistung (5 MW / 30 MW / 100 MW), der Zeitraum (Tag/Nacht), der vorherrschende Verkehrszustand (freier Verkehr, Stau, Teilstau), erfolgreiche Detektion (Ja/Nein), erfolgreiche Tunnelsperrung (Ja/Nein), die Aktivierung des erforderlichen Lüftungsprogramms (Ja/Nein) sowie das Auftreten eines erhöhten Ausmaßes (Ja/Nein).

Diese detaillierte Abbildung der Ereignisabläufe sowie die hochauflösenden numerischen Berechnungen waren notwendig, um die Wirkungsunterschiede abbilden bzw. quantifizieren zu können.

Der Tunnel weist einen durchschnittlichen Notausgangsabstand von ca. 270 m auf. Am angenommenen Brandherd im Tiefpunkt der Röhren beträgt der Abstand zwischen den nächstgelegenen Notausgängen allerdings 290 m. Zusammen mit der Längsneigung von knapp 4 % an der unmittelbar anschließenden Nordrampe ergeben sich damit höhere Risikowerte.

Bezogen auf den richtliniengerecht ausgestatteten Referenzunnel nach RABT mit kombinierter Längslüftung und Rauchabsaugung sowie einem Notausgangsabstand von 300 m weist die Oströhre ein um 21 % niedrigeres Sicherheitsniveau auf. Im Fall der Weströhre ist ein um 5 % geringeres Sicherheitsniveau zu verzeichnen.

Zur Erhöhung der Sicherheit des Untersuchungstunnels kommen sowohl präventive Maßnahmen, welche die Eintrittshäufigkeit auslösender Ereignisse verringern, als auch Maßnahmen, die nach Ereigniseintritt den Ereignisablauf positiv beeinflussen, in Betracht.

Nach einem Ereigniseintritt wirken sich schadensausmaßmindernde Maßnahmen aus, welche die Selbstrettung unterstützen bzw. die Anzahl von potenziell betroffenen Personen reduzieren. Eine schnellere Detektion kann ebenfalls den Erfolg einer Selbstrettung aufgrund einer früheren Alarmierung bzw. Aktivierung von Sicherheitseinrichtungen verbessern. Dies wurde im Planfall 1 detailliert untersucht. Sowohl für die Ost- als auch die Weströhre ergeben sich dabei Verbesserungen des Sicherheitsniveaus.

Durch Maßnahmen zur Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeiten lässt sich die Eintrittshäufigkeit von Unfällen infolge überhöhter Geschwindigkeiten verringern. Hierzu zählt neben der Reduktion der zulässigen Geschwindigkeiten deren Überwachung mittels stationärer Anlagen. Die Untersuchung dieser Variante als Planfall 2 brachte für die Oströhre ein um 15% höheres Sicherheitsniveau und für die Weströhre ein um 49% höheres Niveau im Vergleich zur Ausstattung des Referenzfalls.

Darüber hinaus lässt sich die Anzahl potenziell betroffener Personen über Maßnahmen zur Stauvermeidung verringern.



## **4 Risikoanalyse besondere Charakteristik**

### **4.1 Ausgangslage und Zielsetzung**

Da der geplante Tunnel im Nullfall in der Kombination seiner Eigenschaften (z. B. Längsneigung teilweise über 3 % sowie Lkw-Fahrleistung über 6.000 Lkw•km pro Tag und Röhre bei Tunnellänge über 3.000 m) eine besondere Charakteristik aufweist, ist mit Hilfe eine Risikoanalyse aufzuzeigen, welche spezifischen Risiken sich aufgrund der besonderen Charakteristik für die geplante Elbquerung ergeben und ob zur Gewährleistung der Sicherheit zusätzliche Maßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind, die über den Standard der RABT hinausgehen.

Basis für die vorliegende Untersuchung bilden die Ergebnisse aus der Gefahrenanalyse (Kapitel 2) und dem Verfahren gemäß der "Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" [BAL 2007a]. Die Gefahrenanalyse hat gezeigt, dass hinsichtlich der besonderen Charakteristik die beiden Szenariotypen

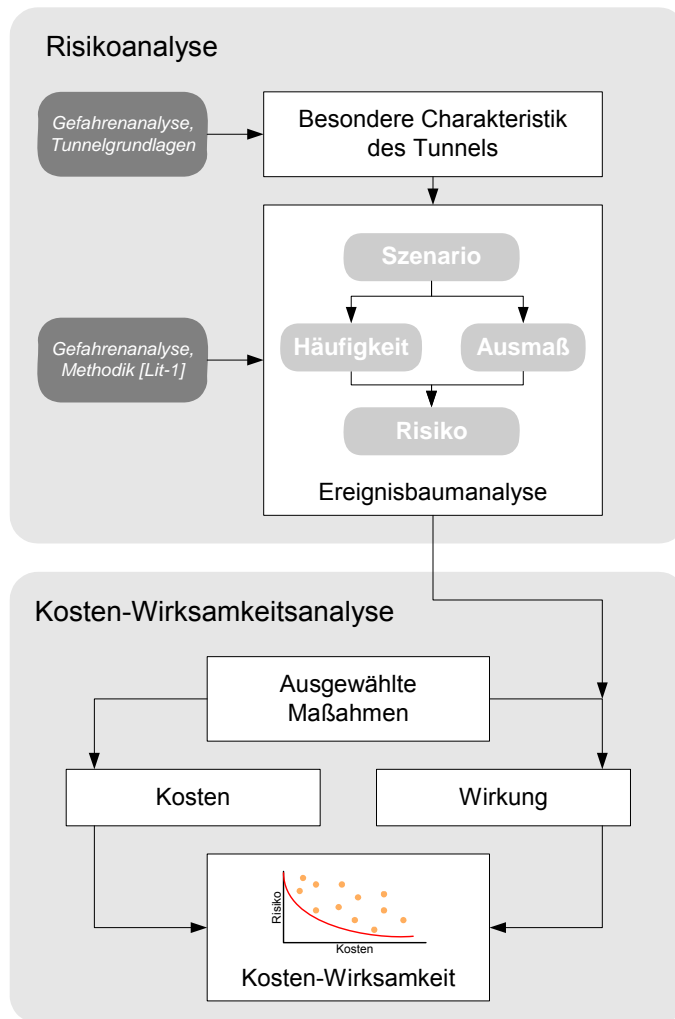
- "Kollision" und
- "Brand"

im Vordergrund stehen.

Ziel der Risiko- bzw. der Kosten-Wirksamkeits-Analyse ist es zu beurteilen, ob und in welchem Umfang weiterführende Maßnahmen hinsichtlich der besonderen Charakteristiken in Frage kommen und gegebenenfalls entsprechend vertieft zu untersuchen sind.

### **4.2 Vorgehen**

Das Vorgehen zur Bewertung der Risiken und zur Untersuchung möglicher zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen orientiert sich an der Methode "Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln" [BAL 2007a]. Teilweise werden für die vorliegenden Betrachtungen Vereinfachungen getroffen. Abbildung 44 zeigt schematisch die Vorgehensschritte:



**Abbildung 44: Vorgehen**

Für die Bewertung der Risiken sind die jeweiligen ortsspezifischen, risikorelevanten Tunnelleigenschaften maßgebend. Aus diesem Grund wird der Tunnel für die Zwecke der Risikoanalyse aus Blickwinkel der besonderen Charakteristik in drei Untersuchungseinheiten gegliedert:

- Segment Nord: km 6+620 bis km 7+440
- Segment Mitte: km 7+440 bis km 11+150
- Segment Süd: km 11+150 bis km 12+290

Die Risiken aufgrund der besonderen Charakteristik werden für die drei Untersuchungseinheiten ermittelt und für den gesamten Tunnel aggregiert.

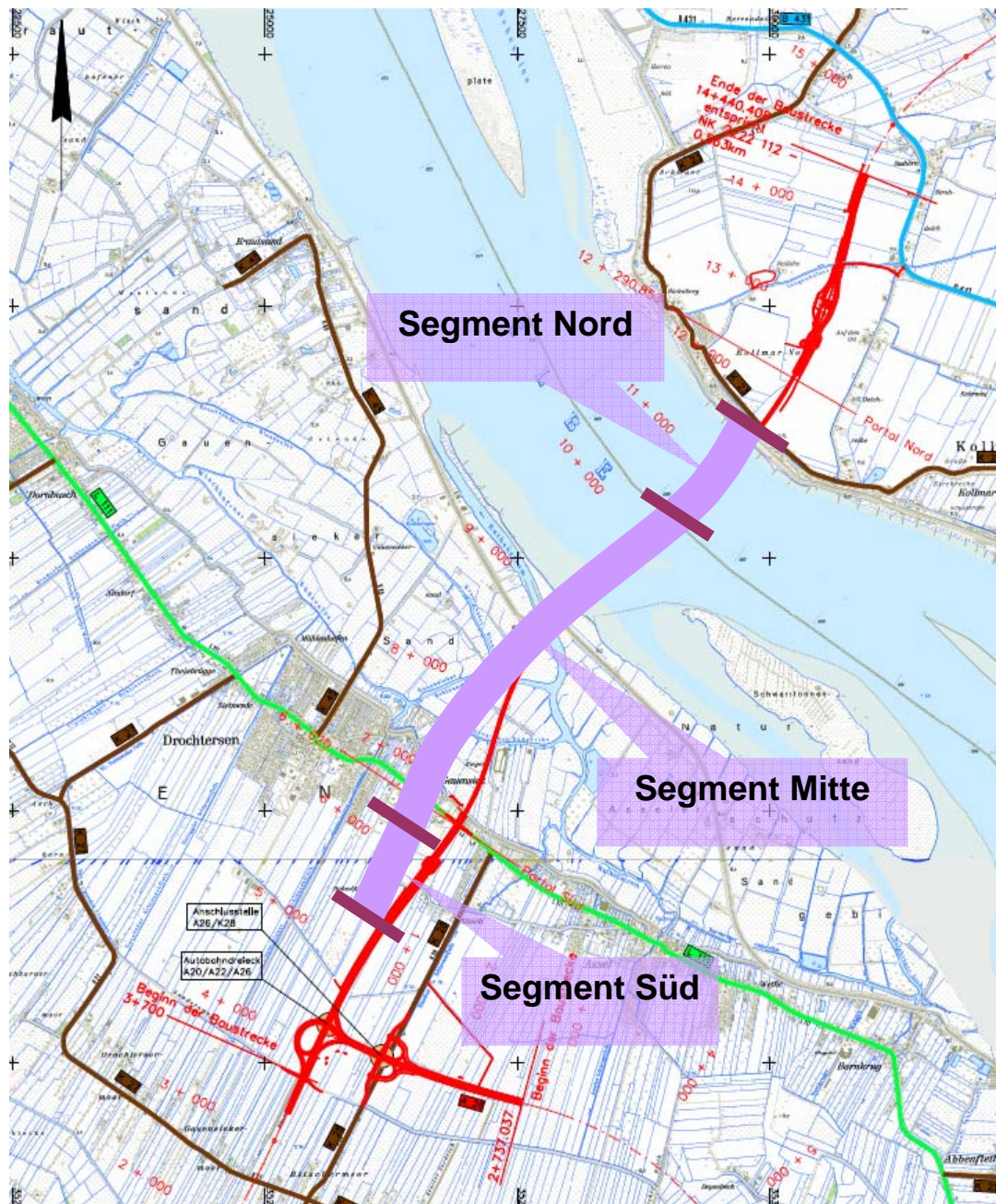


Abbildung 45: Gliederung des Tunnels in Untersuchungseinheiten

## 4.3 Risikoanalyse

### 4.3.1 Besondere Charakteristik des Tunnels

Aus dem im Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT (Abschnitt 0.5) [BAL 2007b] beschriebenen Verfahren zur Ermittlung der tunnelspezifischen Risikokenngrößen resultiert, dass eine besondere Charakteristik für die geplante Elbquerung vorliegt (s. Berechnung der Risikokenngröße in Ab-

schnitt 1.2). Die besondere Charakteristik resultiert dabei aus der Interaktion der nach [BAL 2007a] hauptsächlich risikorelevanten Einflussgrößen

- Tunnellänge
- Röhrenanzahl
- Längsneigung
- Einfluss von Zu- und Abfahrten
- Verkehrsart
- Brandlüftungssystem
- Verkehrsaufkommen mit Lkw-Anteil
- Stauanteil
- Notausgangabstand

Zusätzlich zu den dort berücksichtigten Parametern kommt die Tatsache, dass es sich beim geplanten Tunnel um einen Unterwassertunnel handelt. Alle weiteren Merkmale gem. RABT Kapitel 0.4 sind hinsichtlich einer besonderen Charakteristik singulär betrachtet nicht relevant.

Tabelle 18 fasst neben den in Kapitel 1.1 aufgeführten Tunneleigenschaften weitere spezifische Eigenschaften für die Untersuchungseinheiten zusammen. Als besondere Charakteristik eines Segmentes sind die spezifischen Eigenschaften in ihrer Kombination zu betrachten.

Segmente	Risikorelevante Eigenschaften
Segment Süd	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rampenbereich</li> <li>– Länge ca. 1140 m</li> <li>– Kurvenradius: 4.500 m</li> <li>– Längsneigung: 3%</li> <li>– Zufahrt Autobahn ca. 200m vor Portal</li> <li>– Abstand Notausgänge ca. 300 m</li> </ul>
Segment Mitte	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Länge ca. 3.710 m</li> <li>– leichte Kurvigkeit und Längsneigung</li> <li>– Abstand Notausgänge ca. 290 m</li> </ul>
Segment Nord	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rampenbereich</li> <li>– Länge ca. 820 m</li> <li>– Kurvenradius: 2.400 m</li> <li>– Längsneigung: 4%</li> <li>– Abstand Notausgänge ca. 260 m</li> </ul>

**Tabelle 18: Spezifische Eigenschaften der Segmente**

**4.3.2 Ereignisbaumanalyse: Szenario Kollision**

Struktur Ereignisbaum

Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen die Struktur des Ereignisbaumes für das Szenario Kollision (für die Schadenindikatoren Todesopfer und Sachschäden) gemäß [BAL 2007a]. Sie zeigen die Verzweigungspunkte im Ereignisbaum und die Elemente der Ausmaßberechnung, jeweils nummeriert von 1 bis 10. Die vollständigen Ereignisbäume für die beiden berücksichtigten Schadenindikatoren sind im Anhang dargestellt.

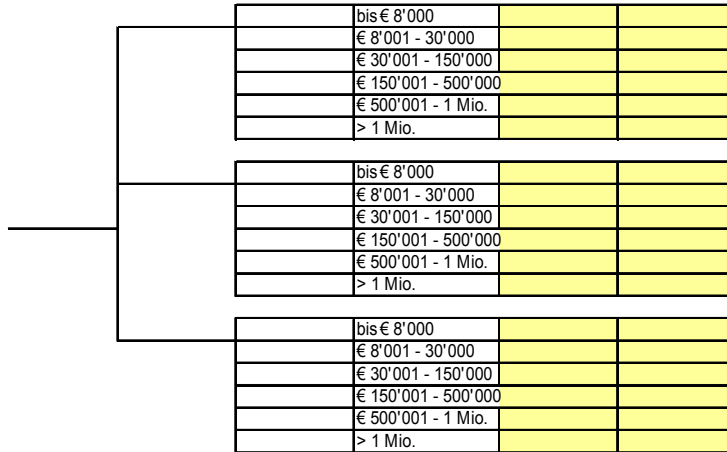
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Initiale Ereignis KOLLISION [1/Jahr]	Unfalltyp: 1 / 6 / 7	Verteilung Schadensausmass	Schadensausmassklasse (Personenschäden)	Häufigkeit	Ausmass (Personenschäden)	Aversionsfaktor $\phi$	$R_e$	Grenzkosten [€]	$R_m$

		Keine Todesopfer		
		1 Todesopfer		
		2-3 Todesopfer		
		4-9 Todesopfer		
		10-30 Todesopfer		
		> 30 Todesopfer		
		Keine Todesopfer		
		1 Todesopfer		
		2-3 Todesopfer		
		4-9 Todesopfer		
		10-30 Todesopfer		
		> 30 Todesopfer		
		Keine Todesopfer		
		1 Todesopfer		
		2-3 Todesopfer		
		4-9 Todesopfer		
		10-30 Todesopfer		
		> 30 Todesopfer		

**Abbildung 46: Struktur Ereignisbaum Szenario Kollision für den Schadenindikator Todesopfer**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Initialereignis KOLLISION [1/Jahr]	Unfalltyp: 1 / 6 / 7	Verteilung Schadensausmass	Schadensausmassklas se (Sachschäden)	Häufigkeit	Ausmass (Sachschäden)	Aversionsfaktor $\phi$	$R_e$	Grenzkosten [€]	$R_m$



**Abbildung 47: Struktur Ereignisbaum Szenario Kollision für den Indikator Sachschäden**

Für die Bewertung der Risiken infolge einer Kollision werden nachfolgend die einzelnen Einflussfaktoren zur Bestimmung der Häufigkeiten/Wahrscheinlichkeiten sowie der resultierenden Schadenausmaße und der erforderlichen Vorgehensschritte dargestellt. Grundsätzlich wurden die bestehenden Grundlagen aus [BAL 2007a] übernommen und für die vorliegende Betrachtung angepasst. Nachfolgend werden die einzelnen Einflussgrößen und die Anpassungen für die Untersuchung der Elbquerung erläutert.

Verzweigungspunkte Ereignisbaum

*Verzweigung 1: Häufigkeit des Initialereignisses Kollision*

Die Häufigkeit  $H_{kol}$  einer Kollision kann gemäß folgender Formel ermittelt werden:

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

Die korrigierte Unfallrate liegt nach [BAL 2007a] für die Elbquerung bei  $2.28 \cdot 10^{-7}$  [1/Fzg·km].

Die Analyse der Tunneleigenschaften zeigt, dass aufgrund der spezifischen Ausgestaltung des Tunnels davon ausgegangen werden kann, dass in den Rampenbereichen (Segment Nord und Segment Süd) aufgrund der Längsgefälleverhältnisse das Potenzial für Kollisionen leicht erhöht ist. Für das Segment Mitte wird

davon ausgegangen, dass im Vergleich zum statistischen Mittelwert keine Erhöhung der Kollisionshäufigkeit aufgrund der Tunneleigenschaften zu erwarten ist.

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der übrigen Tunneleigenschaften (Ausgestaltung, Kurvigkeit etc.) keine maßgebliche Erhöhung der Kollisionshäufigkeit zu erwarten ist.<sup>11)</sup>

Die resultierenden Kollisionshäufigkeiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Korrekturfaktoren sind in der nachfolgenden Tabelle 19 zusammengefasst:

Segment	Korrekturfaktor (Annahme)	H <sub>Kol</sub>
Süd	1.2 (Längsgefälle)	4.0 Kollisionen pro Jahr
Mitte	1	10.8 Kollisionen pro Jahr
Nord	1.4 (Längsgefälle)	3.4 Kollisionen pro Jahr
Summe	--	Ca. 18 Kollisionen pro Jahr

**Tabelle 19: Kollisionshäufigkeiten**

Insgesamt ergibt sich so für die Elbquerung ein Erwartungswert von jährlich rund 18 Kollisionen.

#### *Verzweigung 2: Unfalltyp 1 / 6 / 7*

Die für die Elbquerung maßgeblichen Unfalltypen lassen sich wie folgt gliedern:

- Unfalltyp 1: Fahr Unfall (Selbstunfall z.B. Kollision mit Tunnelinfrastruktur)
- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr (z. B. Auffahrkollision, Kollision bei Spurwechsel)
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall (z.B. Kollision mit Objekten)

In [BAL 2007a] wurde zudem der Unfalltyp 3 (Einbiegen / Kreuzen-Unfall) berücksichtigt. Für die vorliegende Untersuchung ist dieser Unfalltyp jedoch nicht relevant. Für die Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten für die Elbquerung wird wie folgt vorgegangen.

- Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für die Unfalltypen 1, 6 und 7 werden basierend auf den Angaben [BAL 2007a] – unter Berücksichtigung, dass Unfalltyp 3 nicht vorkommt – proportional umgerechnet.
- Es wird davon ausgegangen, dass die oben genannte Erhöhung der Kollisionshäufigkeiten (Verzweigung 1) für die Segment Nord und Süd nur auf die

11) Zwar gibt es weitere Einflussgrößen welche prinzipiell die Kollisionshäufigkeiten erhöhen könnten, deren Einfluss ist jedoch insgesamt zu gering: So kann beispielsweise eine mögliche Mautstation die Wahrscheinlichkeit einer Kollision infolge eines Rückstaus im Tunnel erhöhen. Da jedoch davon ausgegangen werden kann, dass jährlich nur zwischen 10 und 100 Stunden überhaupt eine solche Situation vorliegt, ist die entsprechende Erhöhung der Kollisionshäufigkeit vernachlässigbar klein. E-

Unfalltypen 1 und 6 entfällt und Unfalltyp 7 nicht abhängig ist von Längsgefällverhältnissen im Tunnel. Ferner wird die Annahme getroffen, dass die gesamthaft resultierende Erhöhung der Kollisionshäufigkeiten zu gleichen Teilen auf die beiden Unfalltypen 1 und 6 entfällt.

Auf Basis dieser Grundlagen ergeben sich die in Tabelle 20 ausgewiesenen Verzweigungswahrscheinlichkeiten.

Unfalltyp	Segment Süd	Segment Mitte	Segment Nord
1	0.130	0.128	0.131
6	0.797	0.785	0.806
7	0.073	0.087	0.062

**Tabelle 20: Verzweigungswahrscheinlichkeit nach Unfalltypen für die Elbquerung**

### *Verzweigung 3: Verteilung Schadenausmaß*

Je nach Verlauf und Umständen einer Kollision können unterschiedliche Schadenfolgen resultieren. Um das mögliche Spektrum der Folgen zu berücksichtigen sind nach [BAL 2007a] die Schadenausmaße in sechs Klassen eingeteilt worden. Die Verzweigungswahrscheinlichkeiten für das Schadenausmaß für Personenschäden (Anzahl Todesopfer) sowie für Sachschäden und Verletzte (Summe Euro) in Abhängigkeit des jeweiligen Unfalltyps orientieren sich an [BAL 2007a] und sind in Tabelle 21 und Tabelle 22 dokumentiert.

Unfalltyp	Keine Todesopfer	1 Todesopfer	2-3 Todesopfer	4-9 Todesopfer	10-30 Todesopfer	> 30 Todesopfer
1	0,993	0,006	0,0009	0,00007	0,00002	0,00001
6	0,990	0,0072	0,0027	0,00009	0,000009	0,000001
7	0,995	0,0042	0,0007	0,00009	0,000009	0,000001

**Tabelle 21: Verteilung Schadenausmaß Personenschäden**

Unfalltyp	< 8.000 €	8.001 – 30.000 €	30.001 - 150.000 €	150.001 - 500.000 €	500.001 – 1 Mio. €	> 1 Mio. €
1	0,52	0,34	0,13	0,0089	0,001	0,0001
6	0,685	0,195	0,105	0,0139	0,001	0,0001
7	0,83	0,11	0,03	0,0289	0,001	0,0001



**Tabelle 22: Verteilung Schadenausmaß Sachschäden***Verzweigung 4: Schadenausmaßklasse*

Gliederung der Schadenausmaß für die Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden in Klassen, für welche die entsprechenden Häufigkeiten ermittelt werden.

*Verzweigung 5: Häufigkeit pro Jahr*

Die Szenariohäufigkeit ergibt sich durch die Multiplikation der Häufigkeit des Initiereignisses mit allen bedingten Wahrscheinlichkeiten entlang des entsprechenden Wegs durch den Ereignisbaum.

*Verzweigung 6: Erwartetes Schadenausmaß*

Für die sechs Schadenausmaßklassen aus Tabelle 21 und Tabelle 22 werden je Klasse erwartete Ausmaße (repräsentative Werte je Klasse) festgelegt, welche in die Berechnungen des Risikos eingehen (vgl. [BAL 2007a]).

*Verzweigung 7: Aversionsfaktor*

Für Personenschäden wird von folgendem Aversionsfaktor  $\varphi$  in Abhängigkeit des tatsächlichen Schadenausmaßes ausgegangen:

$$\varphi = \sqrt{\text{Schadenausmass}(\text{Todesopfer})}$$

Für Sachschäden wird von folgendem Aversionsfaktor  $\varphi$  in Abhängigkeit des effektiven Schadenausmaßes ausgegangen:

- Sachschäden < € 5 Mio./ Ereignis:  $\varphi = 1$
- Sachschäden  $\geq$  € 5 Mio./ Ereignis:  $\varphi = 3$

*Verzweigung 8: Bewertetes Risiko  $R_e$* 

Für mit Risiken, welche mit einem Aversionsfaktor gewichtet werden, wird die Bezeichnung "empfundenes" Risiko  $R_e$  verwendet. Dieses lässt sich aus dem Produkt aus Unfallhäufigkeit, Ausmaß und Aversionsfaktor berechnen.

*Verzweigung 9: Grenzkosten*

Über die Grenzkosten (Zahlungsbereitschaft, um Schäden zu verhindern) können die ermittelten Risiken in monetären Einheiten ausgedrückt werden. Nach [BAL 2007a] wird für Kollisionen in Straßentunneln von folgenden Grenzkosten ausgegangen:

- 5 Mio. € pro gerettetes Menschenleben
- 3 € pro 1 € verhinderter Sachschaden (d. h. zur Verhinderung eines Sachschadens in Höhe von 1 €, werden 3 € investiert.)

### *Verzweigung 10: Monetarisiertes Risiko $R_m$*

Das monetarisierte Risiko  $R_m$  wird bestimmt, indem das bewertete Risiko  $R_e$  mit den Grenzkosten multipliziert wird.

#### **4.3.3 Ereignisbaumanalyse: Szenario Brand**

##### Struktur Ereignisbaum

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die Struktur des Ereignisbaumes für das Szenario Brand (für Schadenindikator Todesopfer und Sachschäden/Verletzte). Der Ausschnitt zeigt die Verzweigungspunkte im Ereignisbaum und enthält die Elemente der Ausmaßberechnung, nummeriert von 1 bis 12.

Im Gegensatz zum Vorgehen nach [BAL 2007a] sind Anpassungen und Vereinfachungen an der Struktur des Ereignisbaumes vorgenommen. Zur Ermittlung der Risiken wird bei der vorliegenden Betrachtungstiefe hinsichtlich der besonderen Charakteristik der Ereignisort über den gesamten Tunnel betrachtet. Dazu sind vereinfachte Schadenausmaßbetrachtungen mittels Grobabschätzung hinreichend genau<sup>12</sup>.

Folgende Anpassungen sind für den gesamten Tunnel umgesetzt

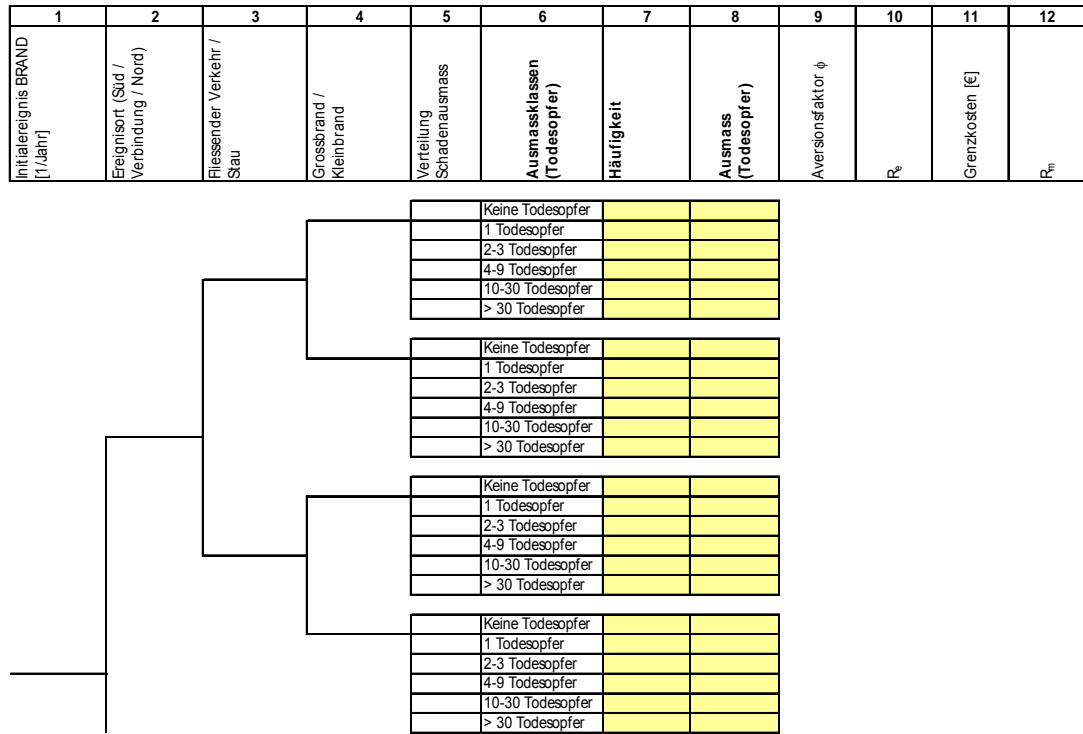
- Die Gliederung der berücksichtigten Brandleistungen wird vereinfacht: Während in [BAL 2007a] die Brandleistungen 5 MW, 30 MW, 50 MW und 100 MW getrennt betrachtet werden, wird in der vorliegenden Untersuchung vereinfachend eine Unterscheidung von Kleinbrand (Brandleistung  $\leq 5$  MW) und Grossbrand ( $> 5$  MW) vorgenommen.
- Die Möglichkeit eines Ausfalls des Lüftungssystems im Ereignisfall wird vereinfachend vernachlässigt.
- Die Schadenausmaßermittlung [BAL 2007a] basiert auf Untersuchung der Rauchgasausbreitung und thermischen Strahlung der Brandereignisse mittels spezifischer Modelle und/oder Simulationen. Für die vorliegende Untersuchung werden auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen aus anderen Studien vereinfachend Abschätzungen herangezogen.

---

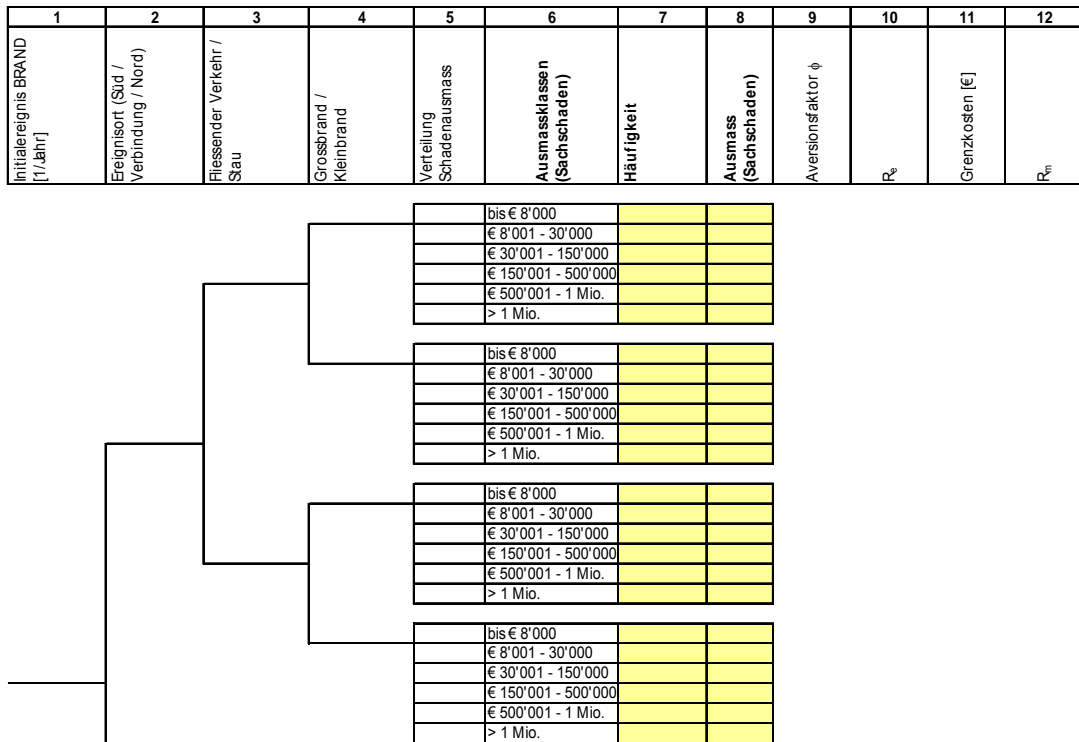
<sup>12</sup> eine exakte Ausmaßabschätzung mit Hilfe von Simulationsrechnungen, wie sie in Kapitel 3 durchgeführt werden, ist bei dieser Betrachtung des gesamten Tunnels nicht möglich. Für ausgewählte Maßnahmen können ggf. zusätzliche vertiefte Betrachtungen in einem weiteren Untersuchungsschritt sinnvoll sein.

- Für das Szenario Brand wurden alle drei Segmente (Nord, Mitte, Süd) in einem Baum vereint dargestellt und die drei Segmente jeweils als Verzweigung aufgeführt.

Die vollständigen Ereignisbäume für die beiden berücksichtigten Schadenindikatoren sind im Anhang dargestellt.



**Abbildung 48: Struktur Ereignisbaum Szenario Brand für den Schadenindikator Todesopfer**



**Abbildung 49: Struktur Ereignisbaum Szenario Brand für den Indikator Sachschäden**

Verzweigungspunkte Ereignisbaum

*Verzweigung 1: Initialereignis Brand / Verzweigung 2: Ereignisort*

Brände in Straßentunneln sind verhältnismäßig seltene Ereignisse und entstehen in erster Linie als Folge von Pannen bzw. technischer Defekte an Fahrzeugen. Im Vergleich dazu ist der Anteil an Bränden infolge von Kollisionen statistisch deutlich kleiner. Gemäß [BAL 2007a] kann die Häufigkeit von Bränden wie folgt ermittelt werden:

- Brände infolge von Pannen und technischen Defekten: Auf Basis der statistischen Brandrate von  $3 \cdot 10^{-9}$  [1/(Fahrzeug•km)] kann unter Berücksichtigung des prognostizierten Fahrzeugaufkommens von 40.100 Fahrzeugen pro Tag die Häufigkeit pro Segment ermittelt werden. Es ist dabei davon auszugehen, dass die Häufigkeit von technischen Defekten proportional zur Tunnelabschnittslänge ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere Brandrate auch für die Elbquerung angenommen werden kann.
- Brände infolge von Kollisionen: Nach statistischen Analysen führen 0.3% aller Kollisionen zu Bränden. Die Ermittlung der Häufigkeit von Kollisionen ist in Kapitel 4.3.2 dargelegt. Basierend auf diesen Ergebnissen lassen sich die Häufigkeiten für Brände infolge von Kollisionen je Segment ermitteln

Für die drei Segmente resultieren die Brandhäufigkeiten gemäß Tabelle 23

Segment	Segment Süd	Segment Mitte	Segment Nord	Summe
Häufigkeit Brand infolge Panne/Defekt	0,05	0,16	0,04	0,25
Häufigkeit Brand infolge Kollision	0,01	0,04	0,01	0,06
<b>Summe</b>	<b>0,06</b>	<b>0,20</b>	<b>0,05</b>	<b>0,31</b>

**Tabelle 23: Häufigkeiten von Bränden für die geplanten Elbquerung<sup>13)</sup>**

Insgesamt lässt sich eine Brandhäufigkeit für den geplanten Tunnel von 0.31 Bränden pro Jahr ermitteln. Die daraus ableitbare Verteilung auf die drei untersuchten Segmente Süd, Mitte und Nord (Verzweigung 2 im Ereignisbaum) ist aus ersichtlich.

Segment	Verzweigungswahrscheinlichkeit (Verzweigung 2)
Segment Süd	0,21
Segment Mitte	0,64
Segment Nord	0,15

**Tabelle 24: Anteil des erwarteten Auftretens an Bränden in den drei Segmenten<sup>14)</sup>**

#### *Verzweigung 3: Fliessender Verkehr / Stau*

Ob sich ein Brand im normalen Verkehr oder bei Stau ereignet, hat in erster Linie auf die Zahl der exponierten/gefährdeten Personen und damit auf das potenzielle Schadenausmaß einen Einfluss. Die entsprechende Verzweigungswahrscheinlichkeit kann über die Zahl der jährlichen Staustunden abgeschätzt werden. Für den Elbtunnel werden von jährlichen 45 Staustunden ausgegangen. Damit ergibt sich ein Wert von 0.995 (Staustunden/Jahresstunden) bzw. 0.005.

#### *Verzweigung 4: Grossbrand / Kleinbrand*

Die Brandleistung (gemessen in Megawatt [MW]) bestimmt maßgeblich das resultierende Schadenausmaß. Während die Personenschäden primär durch die Wirkung der entstehenden Rauchgase bestimmt werden, werden die Sachschäden durch die Hitzewirkung hervorgerufen. Um das Spektrum der Brandlast abzubilden

13) Gerundete Werte

14) Gerundete Werte

werden zwei Fälle unterschieden und ihre jeweilige Wahrscheinlichkeit aus [[BAL 2007a] abgeleitet.

- Kleinbrand ( $\leq 5$  MW): 90%
- Grossbrand ( $> 5$  MW): 10%<sup>15)</sup>

#### *Verzweigung 5: Verteilung Schadenausmaß*

Die Schadenausmaßermittlung nach [BAL 2007a] basiert auf Analysen der Ausbreitungs- und Wirkmechanismen von Bränden mittels spezifischer Modelle und/oder Simulationen. Für die vorliegende Untersuchung werden auf der Grundlage vorliegender Erfahrungen aus anderen Studien vereinfachend Abschätzungen vorgenommen. Dazu werden dieselben Schadenausmaßklassen wie für das Szenario Kollision verwendet und für die einzelnen Ereignisabläufe unter Berücksichtigung der tunnel- bzw. segmentspezifischen Charakteristika die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten abgeschätzt.

Den Abschätzungen werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- Erfahrungsgemäß handelt es sich bei den weitaus meisten Bränden in Tunneln um Fahrzeugbrände, bei denen keine oder nur geringe Sach- und Personenschäden zu verzeichnen sind.
- Für die Abschätzung des Schadenausmaßes der Großbrände wird berücksichtigt, dass Brände im Bereich von 50 MW oder sogar 100 MW sehr selten sind. Dementsprechend werden in erster Linie Brandereignisse im Bereich von 5 MW bis 30 MW für die Abschätzungen der Wirkungen von Großbränden herangezogen.<sup>16)</sup>
- Die Ausbreitung der Rauchgase hängt neben der Wirkung der Tunnellüftung u.a. maßgeblich von den Gefälleverhältnissen ab. Aufgrund der thermischen Effekte ("Kamineffekt") breiten sich mit zunehmendem Längsgefälle die Rauchgase präferenziell stärker und schneller in aufsteigender Richtung aus. Bei erhöhtem Längsgefälle (Segment Süd und insbesondere Nord) wirkt dieser Effekt verstärkt und führt zu einer rascheren Rauchausbreitung und je nach Tunnelgegebenheiten.
- Im Bereich des Segmentes Nord sind aufgrund der erhöhten Längsneigung im Vergleich zu den regulativen Vorgaben geringere Notausgangabstände von 260 m vorgesehen. Dadurch erhöhen sich die Selbstrettungsmöglichkeiten bzw. verringern sich die Fluchtwegdistanzen für die Tunnelbenutzer im Ereignisfall.

---

15) Summe der Wahrscheinlichkeiten für die Brandlasten 30 MW, 50 MW und 100 MW gemäß [BAL 2007a].

16) Die Lüftungseinrichtungen sind nach [WEH 2008] für 100 MW - Brandereignisse ausgelegt.

Die Annahmen zur Verteilung der Schadenausmaße sind nachfolgend in Tabelle 25 (Personenschäden) und Tabelle 26 (Sachschäden) zusammengefasst.

	Keine Todesopfer	1 Todesopfer	2-3 Todesopfer	4-9 Todesopfer	10-30 Todesopfer	> 30 Todesopfer
Großbrand	0,60	0,25	0,10	0,045	0,004	0,001
Kleinbrand Portal Süd	0,95	0,035	0,015	0	0	0
Kleinbrand Mitte	0,99	0,009	0,001	0	0	0
Kleinbrand Portal Nord	0,97	0,02	0,01	0	0	0

**Tabelle 25: Verteilung Schadenausmaß Brand (Personenschäden)**

	< 8.000 €	8.001 – 30.000 €	30.001 - 150.000 €	150.001 - 500.000 €	500.001 – 1 Mio. €	> 1 Mio. €
Großbrand	0,259	0,255	0,425	0,055	0,005	0,001
Kleinbrand	0,974	0,025	0,001	0	0	0

**Tabelle 26: Verteilung Schadenausmaß Brand (Sachschäden und Verletzte)**

#### *Verzweigungen 6 bis 10*

Das Vorgehen zur Festlegung bzw. die Erläuterungen der Verzweigungen 6 bis 10 sind analog zu den entsprechenden Verzweigungspunkten für das Szenario Kollision.

#### *Verzweigung 11: Grenzkosten*

Für das Szenario Brand werden die nach [BAL 2007a] angegebenen Grenzkosten verwendet:

- 10 Mio. € pro gerettetes Menschenleben
- 3 € pro 1 € verhinderter Sachschaden (D.h. zur Verhinderung eines Sachschadens in Höhe von 1 €, werden 3 € investiert.)

#### *Verzweigung 12: Monetarisiertes Risiko $R_m$*

Das Vorgehen zur Festlegung bzw. die Erläuterungen sind analog zum entsprechenden Verzweigungspunkt (Verzweigung 10) für das Szenario Kollision

### **4.3.4 Ergebnisse**

Die Berechnung der Ereignisbäume liefert folgendes Ergebnis zum monetarisierten Risiko  $R_m$ :

	Personenschäden [€/Jahr]		Sachschäden/Verletzte [€/Jahr]		Summe [€/Jahr]
	Kollision	Brand	Kollision	Brand	
<b>Segment Süd</b>	352.057	103.179	155.745	698	611.680
<b>Segment Mitte</b>	947.509	316.445	423.058	2.941	1.689.952
<b>Segment Nord</b>	297.045	121.764	130.549	937	550.296
<b>Tunnel</b>	1.596.612	541.388	709.352	4.577	2.851.928

**Tabelle 27: Übersicht der Ergebnisse (monetarisierter Risiken Rm in [€/Jahr])**

Die Risikoanalyse zeigt, dass die kumulierten monetarisierten Risiken für den geplanten Tunnel bei insgesamt rund € 2,85 Mio. pro Jahr liegen. Rund 56 % der gesamten monetarisierten Risiken entfallen dabei auf Personenschäden infolge von Kollisionen. Für Sachschäden und Verletzte liegt der entsprechende Anteil bei rund 25 %, so dass insgesamt auf Brandereignisse (Personenschäden und Sachschäden/Verletzte) nur 19 % entfallen. Grund dafür ist die Tatsache, dass Kollisionen weitaus häufigere Ereignisse sind als Brände.

Hinsichtlich der drei untersuchten Segmente dominiert der Einfluss des Segments Mitte die ermittelten monetarisierten Risiken mit einem Anteil von rund 60%. Dies ist in erster Linie auf den im Vergleich zu den beiden anderen Segmenten deutlich größeren Längenanteil am Tunnel zurückzuführen.

#### **4.4 Kosten-Wirksamkeitsanalyse zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen**

##### **4.4.1 Zusammenstellung möglicher Maßnahmen**

Aufgrund der besonderen Charakteristik der Elbquerung stellt sich die Frage, inwieweit zusätzliche – über die bestehenden Planungen hinausgehende – Sicherheitsmaßnahmen angezeigt bzw. kostenwirksam sind. Die Zusammenstellung in Tabelle 28 gibt einen exemplarischen Überblick über das Spektrum an möglichen Maßnahmen.<sup>17)</sup>

<sup>17)</sup> Verschiedene der aufgeführten Maßnahmen sind bereits vorgesehen. Aus Blickwinkel der besonderen Charakteristik kann in diesen Fällen geprüft werden, ob eine erhöhte Anzahl solcher Maßnahmen zweckmäßig sind.



Maßnahmen		
Bereiche Bau (Infrastruktur/ - einrichtung)	Allgemein	– Fluchtstollen – Pannenbuchten – Verdichtung der Zahl der Querschläge zu Nachbarröhre
	Kollision	-
	Brand	– Separate Betriebsstraßen als Zufahrt zum Tunnel
Bereich Technik	Allgemein	– Verdichtung Notrufanlagen, – Ausbau Videoüberwachung – Zusätzliche/verbesserte Beleuchtung – Zusätzliche Fluchtwegbeschilderung
	Kollision	– Messstellen zur Geschwindigkeitsüberwachung und -information für Verkehrsteilnehmer
	Brand	– Weiterer Ausbau Lüftungssystem – Zusätzliche Brandmeldeanlagen – Automatische Löschanlagen – Gassensoren – Hydranten/Löschmittel in geringeren Abständen
Bereich Betrieb	Allgemein	– Informationskampagne zum Verhalten in Notsituationen (z.B. Abgabe eines Merkblattes an Mautstation) – Geschwindigkeitsbeschränkung
	Kollision	– Warnschilder: Abstands-/ Geschwindigkeitseinhaltung
	Brand	– Werkfeuerwehr an Portal

**Tabelle 28: Mögliche zusätzliche Maßnahmen**

Erfahrungsgemäß ist die risikomindernde Wirkung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen abnehmend, je besser ausgestattet ein Tunnel ist bzw. je mehr effiziente Sicherheitsmaßnahmen bereits vorliegen. Aufgrund der Tatsache, dass die Elbquerung hinsichtlich der geplanten Maßnahmen bereits einen hohen Stand aufweist, ist zu erwarten, dass nur Maßnahmen mit hohem Risikoreduktionspotenzial und/oder vergleichsweise geringen Jahreskosten<sup>18)</sup> ein günstiges Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis aufweisen. Dementsprechend können verschiedene Maßnahmen aufgrund von Erfahrungen ohne vertiefende Kosten-Wirksamkeits-Analyse als ungeeignet beurteilt werden.

Beispiele von Maßnahmen mit in Anbetracht der bereits vorgesehenen Sicherheitsmaßnahmen vergleichsweise eher geringerem zusätzlichem Risikominderungspotenzial sind:

- Zusätzliche/verbesserte Beleuchtung
- Zusätzliche Fluchtwegbeschilderung
- Messstellen zur Geschwindigkeitsüberwachung, die der Information der Verkehrsteilnehmer über eventuelle Übertretungen dient.

18) Für die Untersuchung einer Maßnahme werden die anfallenden Kosten (Investitionskosten, Betriebskosten, etc.) durch Anwendung der Annuitätenmethode auf Jahreskosten umgerechnet.

- Warningschilder: Abstands-/ Geschwindigkeitseinhaltung

Maßnahmen mit sehr hohen Kostenfolgen und damit einem erfahrungsgemäß eher ungünstigen Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis sind beispielsweise der Bau weiterer Querschläge oder ein zusätzlicher Ausbau des Lüftungssystems. Darüber hinaus ist die risikomindernde Wirkung einer Werkfeuerwehr an den Portalen, insbesondere im Brandfall in der entscheidenden Selbstrettungsphase, nach [TET 2008] nicht gegeben.

#### **4.4.2 Zu untersuchende Maßnahmen**

Deswegen werden für die Kosten-Wirksamkeits-Analyse folgende zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen untersucht:

- Einsatz zusätzlicher Detektionssysteme zur Verkürzung der Detektionszeit
- Geschwindigkeitsüberwachung
- Automatische Löschanlage

Die ersten beiden Maßnahmen wurden bereits als mögliche Maßnahmen zur Risikoreduzierung und zur Kompensation des erhöhten Risikos infolge der Längsneigung über 3 % untersucht (siehe Abschnitte 3.3.3 und 3.3.4). Darüber hinaus wurde in Abschnitt 3.9.6 zusätzlich eine Kostenwirksamkeit beider Maßnahmen nachgewiesen. Die Installation einer Automatischen Löschanlage sind in einem Zusatzbericht separat behandelt [BAL 2010].

#### **4.5 Fazit**

Eine Kosten-Wirksamkeitsbetrachtung wurde für drei zusätzliche Maßnahmen durchgeführt. Sie wurden in Kapitel 3 für den Einsatz zusätzlicher Detektionssysteme zur Verkürzung der Detektionszeit und Geschwindigkeitsüberwachung aufgeführt. Automatische Löschanlagen sind in einer separaten Risikoanalyse [BAL 2010] behandelt.

Daher wird im Rahmen dieser Risikoanalyse in Absprache mit dem Auftraggeber auf weitere Kostenwirksamkeitsuntersuchungen für zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus verzichtet.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die derzeit in der Planung befindliche Elbquerung im Zuge der BAB A20 bei Glückstadt wurde eine Risikoanalyse durchgeführt und im vorliegenden Bericht dokumentiert. Eine Notwendigkeit für eine Risikoanalyse ergibt sich aus der Längsneigung von ca. 4 % über eine Länge von ca. 1,3 km. Eine Längsneigung über 3 % ist nach den RABT nur zulässig, wenn auf Basis von einer Risikoanalyse geprüft wird, ob und in welchem Maße zusätzliche oder verstärkte Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind. Eine weitere Notwendigkeit für eine Risikoanalyse aufgrund vorliegender besonderer Charakteristik ergibt sich aus der Berechnung der Risikokenngröße für die Kollision und den Brandfall nach Leitfaden. Hierbei wird die Interaktion der einzelnen richtliniengetreuen risikorelevanten Parameter überprüft. Zur Abgrenzung des für den vorliegenden Fall zu untersuchenden Umfangs sowie die zu berücksichtigenden projektspezifischen Randbedingungen wurde im Rahmen einer Gefahrenanalyse detailliert festgelegt, welche Szenarien und Einflüsse betrachtet werden müssen.

Die quantitative Risikountersuchung baut auf der im Rahmen der Entwurfsplanung durchgeführten qualitativen Risikoabschätzung auf, die zu einer verstärkten Auslegung der Lüftung und zu einer Reduzierung des Notausgangsabstandes im Bereich des 4 %-tigen Abschnitts geführt hat, ohne jedoch die grundsätzliche Anzahl der Notausgänge zu erhöhen. Zum Nachweis der gleichen Sicherheit des Tunnels mit 4 % Längsneigung im Vergleich zu einem entsprechenden Tunnel mit 3 % Längsneigung wurde der Tunnel zur Abschätzung des Schadenausmaßes im Brandfall in seiner Gesamtheit als 3-dimensionales Modell abgebildet. Aus den zeit- und ortsabhängigen Temperatur und Konzentrationsberechnungen eines Ereignisses am maßgebenden Ort konnte anschließend mit Hilfe von definierten Ereignisabläufen das Risiko des Planfalls und des Vergleichstunnels bestimmt werden. Das Ergebnis zeigt, dass der Tunnel ohne weitere Maßnahmen nicht ganz das Sicherheitsniveau des Vergleichstunnels erreicht.

Für die Risikoanalyse hinsichtlich der besonderen Charakteristik wurde das intrinsische Risiko des Tunnels quantitativ für verschiedene Ereignisorte über Ereignisbaumanalysen bestimmt. Das ermittelte monetarisierte Risiko ist die Basis zur Abschätzung, inwiefern weitere (über die nach Richtlinie notwendigen Ausstattungsmerkmale hinausgehende) bauliche, technische oder betriebliche Maßnahmen kostenwirksam umgesetzt werden können.

Ausgehend von der Notwendigkeit verstärkende sicherheitswirksame Maßnahmen zur Kompensation der Längsneigung über 3 % vornehmen zu müssen, wurde die

Wirksamkeit von zwei Maßnahmen untersucht und nachgewiesen. Zur Begrenzung des Schadenausmaßes im Brandfall wurde eine verkürzte Branddetektion untersucht. Durch diese zusätzliche technische Ausstattung können zum einen die Brandlüftung sowie die Sperrung des Tunnels frühzeitig aktiviert werden und zum anderen können die Tunnelnutzer im Gefahrenbereich eines Brandes deutlich früher zur Flucht aufgefordert werden. Durch diese Maßnahme kann mindestens das gleiche Sicherheitsniveau wie bei einem Vergleichstunnel mit 3 % Längsneigung erreicht werden.

Als weitere Maßnahme wurde die Überwachung der Geschwindigkeit untersucht. Mit Hilfe einer Verkehrssimulation konnte nachgewiesen werden, dass der Verkehrsfluss harmonischer wird, was sich in einer verminderten Anzahl von Spurwechseln durch die Verkehrsteilnehmer als auch in einer Verringerung der Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen darstellt. Durch diese Harmonisierung des Verkehrsflusses kann die Häufigkeit von Verkehrsunfällen gesenkt werden, wodurch ebenfalls das Sicherheitsniveau des Vergleichstunnels mit 3 % Längsneigung erreicht wird. Voraussetzung für die Wirkung ist hierbei eine deutlich sichtbare Information, dass die Geschwindigkeit überwacht wird und die Erfassung der Überschreitung im nicht sichtbaren Lichtspektrum.

Zur Abschätzung, welche der untersuchten Maßnahmen zu empfehlen sind, wurde eine Kosten-Wirksamkeitsbetrachtung vorgenommen. Das Ergebnis zeigt, dass beide Maßnahmen für sich kostenwirksam sind, d. h. die eingesparten volkswirtschaftlichen Kosten deutlich über den jährlichen Investitions- und Betriebskosten liegen.

Da die verkürzte Detektionszeit im Brandfall das Schadenausmaß positiv beeinflusst und die Geschwindigkeitsüberwachung im Tunnel die Ereignishäufigkeit von Unfällen reduziert, wird aufgrund der Kostenwirksamkeit jeder einzelnen Maßnahme empfohlen beide Maßnahmen zur Steigerung des Sicherheitsniveaus für die Elbquerung bei Glückstadt umzusetzen. Dadurch kann mit vergleichsweise kostengünstigen Maßnahmen das grundsätzlich schon hohe Sicherheitsniveau gesteigert werden und das Niveau eines Vergleichstunnels mit 3 % Längsneigung übertroffen werden.

---

**6      Literatur / Quellen**

- [BAL 2007a] Baltzer, Kündig, Locher, Mayer, Riepe, Steinauer, Zimmermann, Zulauf; Forschungsbericht zu FE 03.0378/2004/FRB Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln; BAST Heft B 66
- [BAL 2007b] Baltzer, Mayer, Zimmermann, Zulauf; Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT (Abschnitt 0.5); Veröffentlichung in Vorbereitung BAST 2007
- [BAL 2010] Baltzer, Mayer, Zimmermann, Zulauf; Elbquerung BAB A 20 bei Glückstadt, Untersuchung der Wirksamkeit einer Automatischen Brandbekämpfungsanlage, Zusatzbericht zur Risikoanalyse, Mai 2010
- [BWE 2008] Neubau der A 20, Nord-West-Umfahrung Hamburg, Abschnitt K 28 (Niedersachsen) bis zur B 431 (Schleswig-Holstein), Bauwerksentwurf Elbquerung, Erläuterungsbericht und Plananlagen, 02/2008
- [EWS 1997] EWS - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen - Aktualisierung der RAS-W 86, FGSV-Nr. 132, FGSV-Verlag 1997
- [MAY 2006] Mayer, G.: "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- [MAY 2003a] Mayer, G., Haastert J.: Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43.
- [MAY 2003b] Mayer, G., Baltzer W.: Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Bd. 40, Bauverlag BV.
- [PAS 2006] Pasche, Plöger, Evertz; Neubau der A 20 Katastrophenfall Deichbruch, Hydraulisches Gutachten zur Abschätzung der Folgen, TUHH, Institut für Wasserbau 2006
- [RAA 2008] Rohloff et. al.; Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA); FGSV-Verlag 2008

- 
- [RABT 2006] Baltzer et. al.; Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT; FGSV Verlag 2006
- [KOS 2009] Kossmann, Neubau der A 26/A 20 Nordwestumfahrung Hamburg, Abschnitt K 28 bis zur B 431 - Verkehrsuntersuchung, SSP Consult Februar 2009
- [SCH 2008] Schulz, Sulk; Anlage 1 zu [TET 2008], DMT 09/2008
- [STE 2005] Steinauer, Mayer, Brake, Haack, Schreyer, Grünwald; Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 925, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn 2005.
- [TET 2008] Tetzner, Steinert, Riva; Untersuchung von risikorelevanten Gesichtspunkten sowie Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen des Feuerwehreinsatzes für den Tunnel Elbquerung im Zuge der A 20 bei Drochtersen und Kollmar, Bericht-Nr. 2060 1277 1, DMT GmbH 09/2008
- [WEH 2008] Wehner; A 20 Nord-West-Umfahrung Hamburg, Neubau einer Elbquerung - Vorplanung der Tunnellüftung; HBI 08/2008