

Auftraggeber **Regierungspräsidium Freiburg**
Referat 44 – Strassenplanung
Bissierstrasse 7
D-79114 Freiburg

Projekt **B462 OU Schramberg**

Titel **Quantitative Sicherheitsbewertung**

Dokument **Bericht**

Fassung **Version 1.0 vom 31.10.2023**

Verfasser



nabla
engineering

Autoren **Axel Bassler**
Roman Felix

Impressum

Verfasser Nabla Ingenieure Deutschland GmbH
Kleinmattweg 2
D-79424 Auggen

Tel.: +49 7631 93 17 052
E-Mail: info@nabla-engineering.com

Ansprechperson Axel Bassler
Tel.: +41 79 770 76 33
E-Mail: axel.bassler@nabla-engineering.com

Änderungsverzeichnis	Version	Änderung	Name	Datum
	1.0	Entwurf	FER	31.10.2023

Verteiler	Behörde/Firma	Ansprechperson	V0.1	V --	V --	V --
	Regierungspräsidium Freiburg Referat 44		pdf			

Zusammenfassung

Ausgangslage

Das Regierungspräsidium Freiburg plant eine Ortsumfahrung für den Stadtteil «Talstadt» der Stadt Schramberg im Schwarzwald (Baden-Württemberg). Die Umfahrung soll sowohl zur Verkehrsentslastung der Innenstadt als auch zur Minderung der Unfallrisiken führen und beinhaltet unter anderem eine Tunnelstrecke. Die Tunnelstrecke soll als einröhriger Gegenverkehrstunnel ausgeführt werden. Gemäss derzeitigen Planungsstand gibt es zahlreiche Varianten. In der vorliegenden Sicherheitsbewertung werden folgende Tunnelvarianten näher untersucht:

- H2 (A1013)
- H4 (A1131)
- H5 (A1081)

Die Varianten unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Tunnellänge. Allen Varianten gemeinsam ist jedoch, dass die Tunnel besondere Charakteristiken aufweisen:

- Längsneigungen von bis zu 6%. Gemäss RE-ING bzw. EABT 80/100 sollen bei Neuplanungen Längsneigungen von weniger als 3% angestrebt werden. Längsneigungen von über 5% sollen vermieden werden. Liegen die gewählten Längsneigungen über 3%, sind verstärkte Massnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.
- Kurvenradius von bis zu min. 200 m. Die Haltesichtweiten können nicht eingehalten werden.
- Vorgelagerte Verkehrsknoten. Dies führt zu einer erhöhten Gefährdung in den Portalbereichen.

Im vorliegenden Gutachten soll der Nachweis eines hinreichenden Sicherheitsniveaus im Zusammenhang mit den besonderen Charakteristiken auf Basis einer quantitativen Risikoanalyse erbracht werden.

Sicherheitsbewertung

Die Sicherheitsbewertung beruht auf einer quantitativen Ermittlung der Risiken. Neben den Ereignishäufigkeiten wird dabei das Schadensausmass im Brandfall auf Basis von expliziten Strömungs-, Rauchausbreitungs- und Fluchtwegsimulationen bestimmt. Im Rahmen der Sicherheitsbewertung wurden 219'520 Strömungs- und 439'040 Fluchtwegsimulationen durchgeführt.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen des vorliegenden Gutachtens können wie folgt zusammengefasst werden:

- Risikoermittlung Planungsstand: Für den aktuellen Planungsstand ohne kompensatorische Massnahmen wird kein hinreichendes Sicherheitsniveau prognostiziert. Es sind daher zwingend weiterführende, robust wirkende Sicherheitsmassnahmen in der Planung vorzusehen.
- Risikoermittlung nach Massnahmen: Auf Stufe des gegenwärtigen Planungsstandes werden folgende kompensatorische Massnahmen und deren Kombinationen mit folgendem Ergebnis beurteilt:
 - Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h. Mittels einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h wird grundsätzlich ein hinreichendes Sicherheitsniveau prognostiziert. Die Geschwindigkeitsreduktion stellt eine betriebliche Massnahme dar. Die Prognoseunsicherheit ist durch den Einfluss der Verkehrsteilnehmer im Vergleich zu anderen Sicherheitsmassnahmen, wie Brandlüftung oder Verdichtung der Fluchtwege tendenziell höher.

Insofern sind zur Stabilisierung des Sicherheitsniveaus weitere Sicherheitsmassnahmen zu ergreifen.

- Verdichtete Notausgänge in einem Abstand von max. 150 m und Anordnung einer zusätzlichen Meldekette für die Brandmeldeanlage in Form von Rauchmeldern in einem Abstand von 100 m. Die Fluchtwegverdichtung und die rasche Branddetektion (z.B. mittels Kaltrauchdetektoren) senken die Brandrisiken massgeblich. Deren planerische Umsetzung ist zum Erreichen eines hinreichenden Sicherheitsniveaus erforderlich.

Die Trassierung ist im Zuge der weiteren Planung zu optimieren bzw. die Abweichungen objektspezifisch zu begründen.

Ungeachtet des Akzeptanzniveaus des ermittelten Risikos verbleibt auch für die Ortumfahrung Schramberg die Möglichkeit, dass sich ein Ereignis mit hohem Ausmass tatsächlich realisiert. Insbesondere bei den mit sehr tiefen Eintrittswahrscheinlichkeiten verbundenen Ereignissen mit Bussen, kann auch ein sehr grosses Schadensausmass nicht ausgeschlossen werden. Diese Ereignisse haben somit ein grosses Aversionspotential. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dafür so gering, dass das Risiko als allgemein akzeptiert gelten kann.

Randbedingungen für die weitere Planung

Für die weitere Planung kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die mit den vorgestellten Planungsvarianten H2, H4, H5 verbundenen besonderen Charakteristiken (wie z.B. Steigung über 3%) mit entsprechenden zusätzlichen Sicherheitsmassnahmen kompensiert werden können.

Es ist davon auszugehen, dass zusätzlich zur betriebstechnischen Ausstattung gemäss RE-ING / EABT mindestens die folgenden, zusätzlichen Massnahmen zur Kompensation zu ergreifen sind:

- Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h (ggf. sind auch 70 km/h denkbar – wäre noch zu untersuchen).
- Fluchtwegverdichtung auf einen maximalen Abstand von 150 m.
- Schnelle Branddetektion (60 s) über eine verdichtete Anordnung von Kaltrauchdetektoren.
- Regelung der Längslüftung im Brandfall mittels PID-Regler (FU- gesteuerte Strahlventilatoren).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Grundlagen OU Schramberg	6
2.1	Planungsunterlagen	6
2.2	Bauwerksdaten	6
2.2.1	Situation	6
2.2.2	Tunnelgeometrie	7
2.2.3	Fluchtweg und Notausgänge	10
2.2.4	Lüftungssystem	10
2.2.5	Weitere betriebstechnische Ausstattung	12
2.3	Verkehr	12
3	Sicherheitsbewertung	13
3.1	Methodik	13
3.2	Systemrepräsentation	14
3.2.1	Übersicht Variantenfächer	14
3.2.2	Variante H2	14
3.2.3	Variante H4	21
3.2.4	Variante H5	23
3.2.5	Referenzvariante RABT	25
3.3	Risikoermittlung Planungsstand (M0)	25
3.3.1	Risikoanalyse	25
3.3.2	Risikobewertung (M0)	28
3.4	Massnahmenplanung	28
3.4.1	Risikoreduzierende Massnahmen	28
3.4.2	Risikoermittlung nach Massnahmen	29
3.4.3	Risikobewertung nach Massnahmen	31
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	32
Anhang		
A	Methodik	

1 Einleitung

Das Regierungspräsidium Freiburg plant eine Ortsumfahrung für den Stadtteil Talstadt der Stadt Schramberg im Schwarzwald (Baden-Württemberg). Die Umfahrung soll sowohl zur Verkehrsentslastung der Innenstadt als auch zur Minderung der Unfallrisiken führen und beinhaltet unter anderem eine Tunnelstrecke. Die Tunnelstrecke soll als einröhriger Gegenverkehrstunnel ausgeführt werden.

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) hat bereits die generelle Zustimmung zur Weiterplanung erteilt und Ende 2022 wurde ein Planungsauftrag für die Projektphasen Grundlagenermittlung und Vorplanung an ein Planungsbüro erteilt. Im Zuge der Zustimmung wurden durch das BMVD-Konkretisierungen im Hinblick auf das Planungsprogramm formuliert. So soll die Variante H2 den heutigen Anforderungen angepasst und weiteren noch zu entwickelnden Varianten gegenübergestellt werden.

Die im Jahre 2019 von Nabla Engineering begonnene sicherheitstechnische Begleitplanung soll nun vor diesem Hintergrund weitergeführt werden. Gegenstand der ergänzenden Untersuchungen ist, nach Massgabe des BMVD, die Prüfung der sicherheitstechnischen Auswirkungen der besonderen Charakteristiken der Tunnelstrecken gemäss derzeitigem Planungsstand. Dabei ist insbesondere die erhöhte Längsneigung von bis zu 6% zu berücksichtigen. Gemäss RE-ING bzw. EABT 80/100 sollen bei Neuplanungen Längsneigungen von weniger als 3% angestrebt werden. Längsneigungen von über 5% sollen vermieden werden. Liegen die gewählten Längsneigungen über 3% sind verstärkte Massnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen. Die Notwendigkeit und die Wirksamkeit der Massnahmen ist im Rahmen einer Sicherheitsbewertung auf Basis einer Risikoanalyse nachzuweisen.

In der sicherheitstechnischen Untersuchung aus dem Jahr 2019 wurde bereits festgestellt, dass in der weiteren Planung ein geeignetes Lüftungs- und Fluchtwegkonzept festzulegen und der Nachweis eines hinreichenden Sicherheitsniveaus im Zusammenhang mit der Längsneigung auf Basis einer quantitativen Risikoanalyse zu erbringen ist. Im Zuge der parallellaufenden Vorplanung sind insbesondere für die Bauplanung entsprechende Vorgaben im Hinblick auf die Fluchtwege (Abstand und Anzahl) und die Lüftungsanlage (Zwischendecke, Betriebsgebäude, Rettungstollen) zu formulieren.

2 Grundlagen OU Schramberg

2.1 Planungsunterlagen

Der vorliegende Bericht wird auf Basis von folgenden Planungsdokumenten (vgl. Quellenverzeichnis) erarbeitet:

- Richtlinien und Normen [1] bis [10]
- Projektunterlagen [11] bis [19]

2.2 Bauwerksdaten

2.2.1 Situation

Der Streckenabschnitt liegt im Zuge der B462 in der Gemarkung der Stadt Schramberg im Schwarzwald (Baden-Württemberg) und ist Bestandteil der Nordumfahrung der Stadt. Gemäss derzeitigem Planungsstand gibt es zahlreiche Varianten. In der vorliegenden Sicherheitsbewertung werden folgende Tunnelvarianten näher untersucht:

- H2 (A1013)
- H4 (A1131)
- H5 (A1081)

Abgrenzung: Der Variante H5 ist ein kurzer, 440 m langer Tunnel vorgelagert. Dieser wird in den vorliegenden Untersuchungen nicht berücksichtigt.

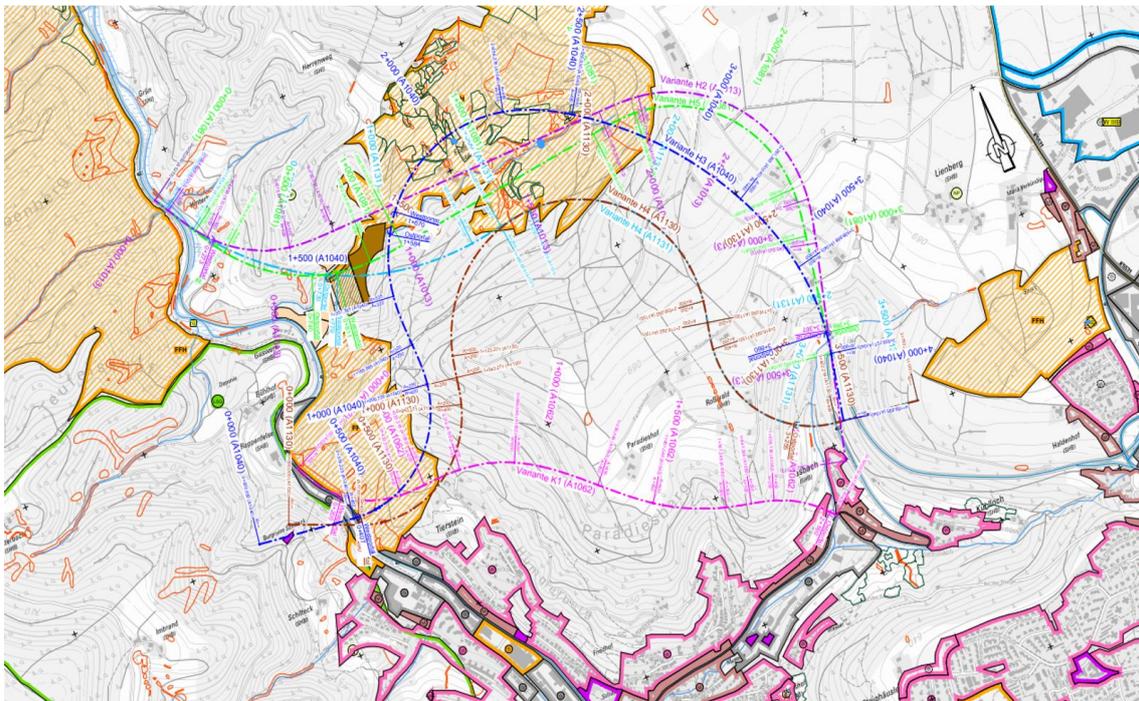


Abbildung 1: Übersichtsplan Varianten OU Schramberg [15]

2.2.2 Tunnelgeometrie

Die Tunnel sind als einröhrige Gegenverkehrstunnel vorgesehen. Bei den Varianten H2 und H4 sind beidseitig der Portale Knotenpunkte vorhanden, während für die Variante H5 nur ein Knotenpunkt am Ostportal geplant ist.

Die Ausrichtung der Tunnel verlaufen von West nach Ost. Während die Längen der Tunnelvarianten zwischen 2.5 km bis 3.1 km variieren, ist allen Varianten eine sehr hohe Längsneigung gemeinsam. Als Regelquerschnitt kommt die Ausführung RQ 11.5T mit zwei Fahrspuren und beidseitigem Bankett zur Anwendung.

Tabelle 1: Geometrische Eckdaten Varianten OU Schramberg

Parameter	H2	H4	H5
Betriebsart	Gegenverkehr	Gegenverkehr	Gegenverkehr
Westportal	km 0+273	Km 0+290	Km 0+811
Ostportal	km 3+367	Km 3+255	Km 3+368
Tunnellänge	3'094 m	2'965 m	2'557 m
Anzahl Fahrstreifen	2	2	2
Regelquerschnitt	RQ 10.5T	RQ 10.5T	RQ 10.5T
Längsneigung	km 0+273 – 3+325: 6.0% km 3+325 – 3+367: 2.5%	km 0+290 – 0+422: 2.5% km 0+422 – 3+255: 5.473%	km 0+811 – 3+317: 6.0% km 3+317 – 3+368: 2.5%
Kurvenradien	Km 0+273 – 0+575: 500 Km 0+575 – 0+755: 300 Km 0+755 – 1+879: ∞ Km 1+879 – 2+042: 300 Km 2+042 – 2+882: 550 Km 2+882 – 3+045: 300 Km 3+045 – 3+367: ∞	Km 0+290 – 0+943: 400 Km 0+943 – 1+043: 200 Km 1+043 – 1+123: 200 Km 1+123 – 2+636: 500 Km 2+636 – 2+716: 200 Km 2+716 – 2+816: 200 Km 2+816 – 3+255: 400	Km 0+811 – 0+922: 650 Km 0+922 – 1+060: 300 Km 1+060 – 1+909: ∞ Km 1+909 – 2+089: 300 Km 2+089 – 2+830: 500 Km 2+830 – 3+010: 300 Km 3+010 – 3+368: ∞
Tunnelbreite	Ca. 10.2 m (2 x 3.75 m + 2 x 1.35 m)	Ca. 10.2 m (2 x 3.75 m + 2 x 1.35 m)	Ca. 10.2 m (2 x 3.75 m + 2 x 1.35 m)
Bereich ohne Zwischendecke (bis 300 m Entfernung zum Portal) – Fahrraum			
Querschnitt	49.5 m ²	49.5 m ²	49.5 m ²
Umfang	28.9 m	28.9 m	28.9 m
Tunnelhöhe	4.9 m	4.9 m	4.9 m
Bereich Zwischendecke (ab 300 m Entfernung zum Portal) - Fahrraum			
Querschnitt	60.2 m ²	60.2 m ²	60.2 m ²
Umfang	30.0 m	30.0 m	30.0 m
Tunnelhöhe	6.9 m	6.9 m	6.9 m

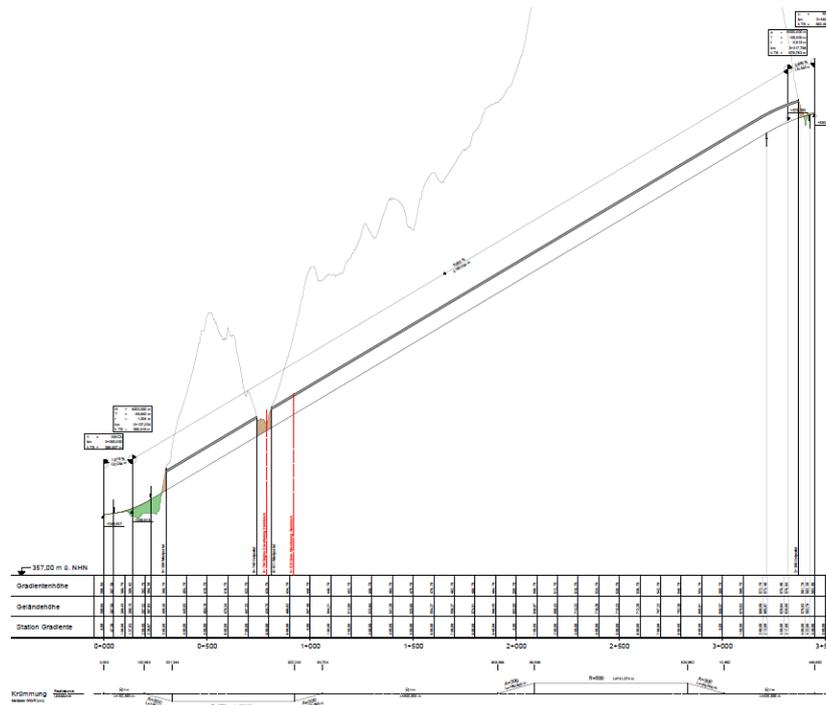


Abbildung 5: Höhenplan Variante H5 [18]

2.2.3 Fluchtweg und Notausgänge

Die Notausgänge werden in einem regelmässigen Abstand von max. 300 m vorgesehen:

- H2: 10 Notausgänge in einem Abstand von 281 m
- H4: 9 Notausgänge in einem Abstand von 296.5 m
- H5: 8 Notausgänge in einem Abstand von 284 m

2.2.4 Lüftungssystem

Lüftungssystem

Bei einer Tunnellänge von über 1'200 m wird als Lüftungssystem eine Rauchabsaugung über Zwischendecke angenommen. Für die Modellierung werden folgende Annahmen getroffen:

Strahlventilatoren

Es werden Strahlventilatoren der Baureihe 1250 vorgesehen, mit 2025 N Standschub, reversibel.

Tabelle 2: Strahlventilatordaten

Laufreddurchmesser	1250 mm
Volumenstrom	46.7 m ³ /s
Ausblasgeschwindigkeit	38.0 m/s
Standschub (reversibel)	2025 N
Motorleistung	75 kW

Die insgesamt 18 Strahlventilatoren werden in 6 Gruppen zu je 3 Strahlventilatoren in Portalnähe angeordnet.

Tabelle 3: Positionierung der Strahlventilatoren

Gruppe	Stationierung	Abstand	Anzahl SV Typ 1250	Bemerkung
Variante H2				
-	km 0+273	.	-	Westportal
SVG 1	Km 0+353	80 m	3	
SVG 2	Km 0+433	80 m	3	
SVG 3	Km 0+513	80 m	3	
SVG 4	Km 3+127	2'614 m	3	
SVG 5	Km 3+207	80 m	3	
SVG 6	Km 3+287	80 m	3	
-	km 3+367	80 m	-	Ostportal
Variante H4				
-	Km 0+290	.	-	Westportal
SVG 1	Km 0+370	80 m	3	
SVG 2	Km 0+450	80 m	3	
SVG 3	Km 0+530	80 m	3	
SVG 4	Km 3+015	2'485 m	3	
SVG 5	Km 3+095	80 m	3	
SVG 6	Km 3+175	80 m	3	
-	Km 3+255	80 m	-	Ostportal
Variante H5				
-	Km 0+811	.	-	Westportal
SVG 1	Km 0+891	80 m	3	
SVG 2	Km 0+971	80 m	3	
SVG 3	Km 1+051	80 m	3	
SVG 4	Km 3+128	2'077 m	3	
SVG 5	Km 3+208	80 m	3	
SVG 6	Km 3+288	80 m	3	
-	Km 3+368	80 m	-	Ostportal

Abluftventilatoren

Die Absaugmenge beträgt im Bereich der Zwischendecke rund 200 m³/s. Die notwendige Absaugleistung wird durch zwei Axialventilatoren mit je 100 m³/s realisiert.

Steuerbare Abluftklappen

Zur Absaugung werden in einer Entfernung von 300 m vom Portal alle rund 100 m Absaugklappen in der Zwischendecke vorgesehen.

Mess- und Detektionseinrichtungen

Es werden die für das Lüftungssystem erforderlichen Mess- und Detektionseinrichtungen vorausgesetzt:

- Sichttrübe (SI):
- Kohlenmonoxid (CO):
- Strömung (STR):

- Branddetektion mittels einen Linienbrandmeldekabels

Steuerung - Automatische Brandfalllüftung

Im Portalbereich werden die Rauchgase auf den ersten 300 m mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1.5 m/s aus dem nächstgelegenen Portal ausgeblasen. Dazu werden jeweils die SV im gegenüberliegenden Tunnelast verwendet.

Im Bereich der Zwischendecken werden die Rauchgase durch die vier zum Brandort nächstgelegenen Abluftklappen über einen Bereich von 300 m abgesaugt. Es wird eine symmetrische Zuströmung zum Brandort hin angestrebt. Dazu werden alle SV im rauchfreien Bereich betrieben.

Zur Beeinflussung der Längsströmung wird ein PID-Regler mit einem Anti-Windup und einem Tiefpassfilter vorgesehen:

Tabelle 4: Regelparameter

Parameter	H2	H4	H5
P	6.33	6.16	5.67
I	59.77	58.96	55.62
D	6.71	6.65	6.32

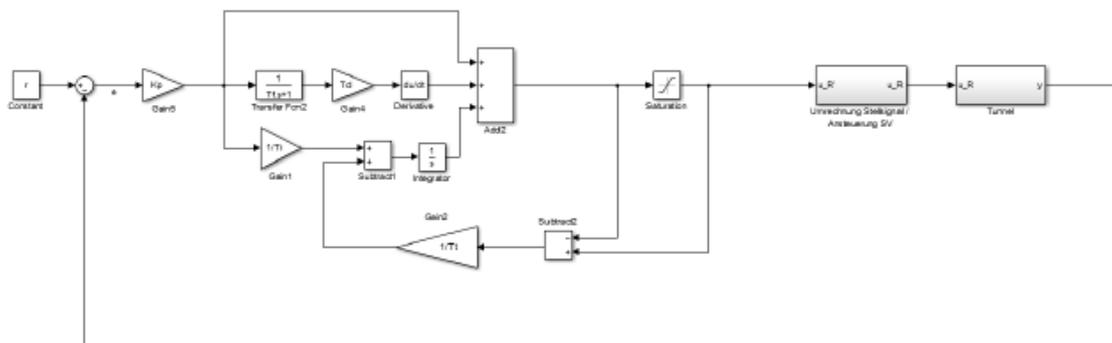


Abbildung 6: Blockschaltbild PID-Regler

2.2.5 Weitere betriebstechnische Ausstattung

Es wird angenommen, dass die weitere betriebstechnische Ausstattung hinsichtlich der Funktionalität für die Verkehrsteilnehmenden der RE-ING / EABT entspricht.

2.3 Verkehr

Tabelle 5: Verkehrsdaten OU Schramberg

Parameter	Alle Varianten
DTV	10'000 Fz/24h
Schwerverkehrs-Anteil	10%
Bus-Anteil am Schwerverkehr	5%
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
Stauhäufigkeit	gering

3 Sicherheitsbewertung

3.1 Methodik

Für die Erarbeitung der quantitativen Sicherheitsbewertung gelangt das von Nabla Engineering entwickelte Risikoanalyse-(RA-) Modell **NablaRiskPro** zur Anwendung. Das RA-Modell *NablaRiskPro* kann sowohl die mit dem Nichtgefahrguttransport als auch die mit dem Gefahrguttransport verbundenen Personenrisiken in Strassentunneln abbilden. Das RA-Modell *NablaRiskPro* entspricht grundsätzlich den methodischen Vorgaben der BAST und wurde bereits vielfach für die Risikoanalysen u.a. auch für den Altstadtringtunnel, verwendet.

Die Szenarienauswahl erfolgt gemäss dem Heft B66:

- Kollision (ohne Brand):
Ein oder mehrere Fahrzeuge sind in eine Kollision im Tunnel verwickelt. Der Szenariotyp "Kollision (ohne Brand)" umfasst dabei folgende Teilszenarien:
 - Fahr Unfall (Unfalltyp 1; Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur)
 - Einbiegen / Kreuzen Unfall (Unfalltyp 3; Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel)
 - Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6; z. B. Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel in einem Richtungsverkehrstunnel)
 - Sonstiger Unfall (Unfalltyp 7; z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)
- Brand (ohne Gefahrgüter gemäss ADR):
Ein Fahrzeug gerät wegen eines technischen Defekts oder als Folge einer Kollision in Brand. Der Szenariotyp "Brand ohne Gefahrgüter gemäss ADR" umfasst dabei folgende Teilszenarien:
 - Brand mit einer Brandleistung von 5 MW (z. B. Brand eines Pkw)
 - Brand mit einer Brandleistung von 30 MW (z. B. Brand eines Lkw/Reisebusses)
 - Brand mit einer Brandleistung von 50 MW (z. B. Brand eines Lkw)
 - Brand mit einer Brandleistung von 100 MW (z. B. Brand zweier Lkw nach einer Kollision)

Dem Heft B66 folgend werden keine Gefahrgutrisiken berücksichtigt. In der Regel sind die Eintretenswahrscheinlichkeiten dieser Ereignisse um mindestens einen Faktor 10 tiefer, so dass in diesem Vertiefungsschritt die Gefahrgutrisiken gegenüber den Nichtgefahrgutrisiken zunächst vernachlässigbar sind. Die Beurteilung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten erfolgt mittels einer eigenständigen Methodik zur Risikoermittlung.

Die detaillierten Grundlagen zur angewandten Methodik können dem Anhang A entnommen werden.

3.2 Systemrepräsentation

3.2.1 Übersicht Variantenfächer

Für die vorliegenden Untersuchungen werden die Tunnelvarianten der Ortsumfahrung Schramberg mit den verschiedenen Eigenschaften modelliert. Zur Beurteilung des Sicherheitsniveaus wird jeweils ein RABT-Referenzunnel¹ betrachtet.

Für jeden Ereignisort werden die charakteristischen Eigenschaften der entsprechenden Varianten berücksichtigt. Dazu wird der betrachtete Streckenabschnitt in homogene Segmente gegliedert. Segmente sind homogen, wenn sich die Eigenschaften der verwendeten Indikatoren nicht ändern. Innerhalb der Streckensegmente werden die detaillierten geometrischen Daten des Tunnels (Querschnittsgeometrie, Längsprofil, Anordnung Elemente der Tunnellüftungsanlage etc.) berücksichtigt.

Für die Bevölkerung besteht insbesondere bei einer Freisetzung toxischer Gase grundsätzlich eine Gefährdung. Da jedoch in der Sicherheitsbewertung nur die Szenariotypen Kollision bzw. Brand zu betrachten sind, kann das Siedlungsgebiet bzw. grössere Personenansammlung ausserhalb des Tunnels hinsichtlich des Schadenindikators Todesopfer vernachlässigt werden.

3.2.2 Variante H2

Übersicht

Tabelle 6: Systemrepräsentation H2 (km 0+000 Westportal)

Segment		Verkehr					Anzahl Fahrspuren [-]	Betriebsform
Von [m]	Bis [m]	Anzahl Zeitperioden [-]	DTV [Fz/24h]	Anteil SV [%]	Anteil Bus am SV [%]	Stau [%]		
0	50	Tag / Nacht	10'000	10.0	5.0	Gering (vgl. Tabelle 8)	2	GV
50	150							
150	300							
300	302							
302	482							
482	1606							
1606	1769							
1769	2608							
2608	2772							
2772	2794							
2794	2944							
2944	3044							
3044	3052							
3052	3094							

¹ In diesem Bericht wird der Referenzunnel weiterhin noch als RABT-Referenzunnel bezeichnet. Die Änderungen beim mittlerweile erfolgten Übergang von der RABT zur RE-ING Teil 3 sind aber inhaltlich bereits berücksichtigt.

Segment		Längsneigung [%]	Geometrie				Zu-/Abfahrt [-]	Kurvenradien [m]	
Von [m]	Bis [m]		Querschnitt [m ²]	Umfang [m]	Breite [m]	Typ [-]			
0	50	6.0%	60.2	30	10.2	Gewölbe	Nein	500	
50	150							300	
150	300							∞	
300	302		49.5	28.8	10.2	Rechteck		300	
302	482							∞	
482	1606							300	
1606	1769							550	
1769	2608							300	
2608	2772							∞	
2772	2794		60.2	30	10.2	Gewölbe		∞	
2794	2944								
2944	3044								
3044	3052								
3052	3094	2.5%							

Segment		Fahrspurbreite [m]	Beleuchtung [cd/m ²]	Notbeleuchtung [-]	Unfallrate [1/(Fz,km)]	Geschwindigkeit [km/h]	Alarmierung [-]	Zone Fahrtrichtung [-]	
Von [m]	Bis [m]							W -> O	O -> W
0	50	3.75	Normkonform	Ja	Basisunfallrate: 6.81E-07 UMF je homogenes Segment (vgl. nachfolgende Ausführungen)	80	Funk UKW SOS Video	2 6	
50	150							3 5	
150	300								
300	302								
302	482								
482	1606								
1606	1769								
1769	2608								
2608	2772								
2772	2794								
2794	2944								
2944	3044							5 3	
3044	3052							6 2	
3052	3094								

Segment		Lüftung			Brand detektionszeit [s]	Notausgänge [m]	Randbedingungen [-]	Erfolgreiche Fremdrettung
Von [m]	Bis [m]	Art [-]	Betrieb SV [-]	Strömungsgeschwindigkeit ² [m/s]				
0	50	Rauchabsaugung über Zwischendecke (vgl. Kap. 2.2.4)			180	10 NA Abstand 281 m	10 Randbedingungen (vgl. Tabelle 10)	80%
50	150							
150	300							
300	302							
302	482							
482	1606							
1606	1769							
1769	2608							
2608	2772							
2772	2794							
2794	2944							
2944	3044							
3044	3052							
3052	3094							

Für die Modellierung werden folgende Annahmen getroffen:

Zeitperioden und Stau

Für die Risikoberechnungen wird das Verkehrsaufkommen entsprechend der Zeitperioden gemäss Methodik BAST [3] (*Tag- und Nachtstunden*) aufgeteilt und berücksichtigt. Der Verkehr wird gleichmässig auf beide Fahrtrichtungen aufgeteilt.

Tabelle 7: Zeitperioden mit Verkehrsstärke

Parameter Verkehr		
Zeitperiode gemäss Methodik BAST [3]		
Tag	[hh:mm]	6:00 - 21:00
Nacht	[hh:mm]	21:00 - 6:00
Verkehrsstärke		
Tag	[Kfz/6:00 - 21:00]	1.3 x DTV / 24
Nacht	[Kfz/21:00 - 6:00]	0.5 x DTV / 24

Tabelle 8: Zeitperioden und Stau

	Tag	Nacht
Verkehr je Fahrtrichtung [Kfz/h]	270.8	104.2
Stauhäufigkeit [%]	1%	0.1%

Anteil Bus am SV

Für den Anteil Busse am Scherverkehr wird der Durchschnittswert für Deutschland von 5% verwendet.

Unfallrate

Den Überlegungen wird eine Basisunfallrate zugrunde gelegt. Diese ist aus statistischen Daten gewonnen und stellt gewissermassen den anzutreffenden Normalfall dar. Da die Ortsumfahrung

² Positiv von Nord nach Süd

Schramberg keine unterirdischen Zu- und Abfahrten im Tunnel aufweist, wird die Basisunfallrate für einen Gegenverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrt gemäss Heft B66 von $6.81 \times 10^{-7}/(Fz, km)$ angesetzt.

Um Abweichungen vom Normalfall zu modellieren, wird die Basisunfallrate mit Modifikationsfaktoren (kurz: UMF) versehen:

- Unfallrate = Basisunfallrate x UMF

Der UMF reflektiert die prozentuale Veränderung der Unfallrate, die erwartet werden kann, wenn einer oder mehrere Indikatoren vom Normalfall abweichen. Gemäss dem aktuellen Forschungsbericht [9] hängt die Unfallrate insbesondere von folgenden elf Indikatoren ab:

- Zone
- Längsneigung
- Anteil Schwerverkehr
- Verkehrsführung
- Fahrspurbreite
- Beleuchtung
- Kurvenradius
- Ein-/Ausfahrt
- Verkehrsstärke
- Anzahl Fahrspuren
- Spurwechsel
- Signalisierte Geschwindigkeit

Als UMF werden nur diejenigen Grössen berücksichtigt, die sich über die einzelnen, homogenen Tunnelsegmente oder den verschiedenen Varianten hinweg ändern:

- Längsneigung: In den Untersuchungen wird ein mathematischer Zusammenhang zwischen der Längsneigung und dem Modifikationsfaktor der Unfallrate beschrieben:

$$UMF_{Längsneigung} = e^{0.081 (G - G_{REF})}$$

mit:

- G: objektspezifische Längsneigung [%]
- G_{REF}: Mittlere Längsneigung über Tunnelinventar (Annahme: 2%)
- Zone: In Statistiken von Unfällen wurde beobachtet, dass insbesondere in den Einfahrtsbereichen die Unfallrate signifikant höher liegt als in der Mitte des Tunnels. Daher wird der Tunnel in Anlehnung an den Forschungsbericht [10] in fünf diskrete Zonen eingeteilt. Jeder Zone wird ein aus Statistiken gewonnener Unfallmodifikationsfaktor zugeordnet.

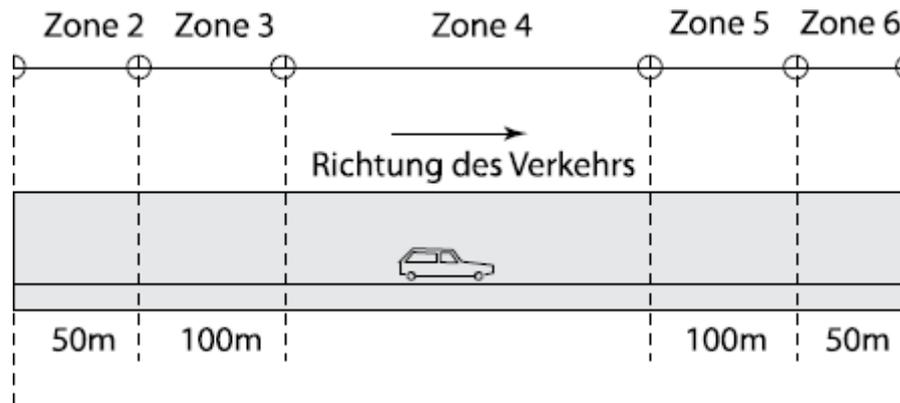


Abbildung 7: Illustration der verschiedenen Zonen im Tunnel [6]

Tabelle 9: UMF Zonen

Zone	UMF
2	2.8236
3	2.1785
4	0.9094
5	1.3071
6	2.1177

- Verkehrsknoten vor beiden Portalen: Vor den Portalen ist jeweils ein Knotenpunkt vorgesehen. Zur Modellierung dieser besonderen Charakteristik wird auf den ersten 150 m (Bereich der Haltesichtweite) ein UMF von 1.44 angesetzt (Verhältnis der Unfallrate mit Zu-/Abfahrt im Vergleich ohne Zu-/Abfahrt gemäss Heft B66: $9.81 / 6.81 = 1.44$).

- Signalisierte Geschwindigkeit: Die signalisierte Geschwindigkeit ist ein Schlüsselfaktor für die Verkehrssicherheit. Die Unfallrate steht in einem exponentiellen Verhältnis zur gefahrenen Geschwindigkeit:

$$y_1 = (v_1 / v_{ref})^{2.0}$$

mit:

- y: Erwartete Anzahl an Ereignissen
- v: Signalisierte Geschwindigkeit [km/h]
- v_{ref} : Referenzgeschwindigkeit [km/h], hier: 80 km/h

Die Verletzten- und Todesfallrate Kollision steht in einem exponentiellen Verhältnis zur gefahrenen Geschwindigkeit:

$$y_1 = (v_1 / v_{ref})^z$$

mit:

- y: Erwartete Anzahl an Todesopfern / Verletzten
- v: Signalisierte Geschwindigkeit [km/h]
- z: Exponent (z Verletztenrate: 3, z: Todesfallrate: 4)

- Kurvenradius: Die Unfallrate in Kurven nimmt mit steigender Fahrgeschwindigkeit zu. Dies liegt zum einen an einer begrenzten Sichtweite und einem zunehmenden Anhalteweg, zum anderen führen kleine Fahrfehler in Kurven leichter zum Verlassen der Fahrbahn und damit zu Unfällen.

Gemäss dem Forschungsbericht [10] kann die Beziehung beschrieben werden durch (vgl. Abbildung 8):

$$UMF = \max((- \ln(z) * 1.508 * 10^{-4} + 1.119 * 10^{-8})v^2 - (\ln(z) * 1.217 * 10^{-4} + 1.237 * 10^{-2}) * v + 1; 0.95)$$

mit

- z: Kurvenradius [m]
- v: signalisierte Geschwindigkeit [km/h]

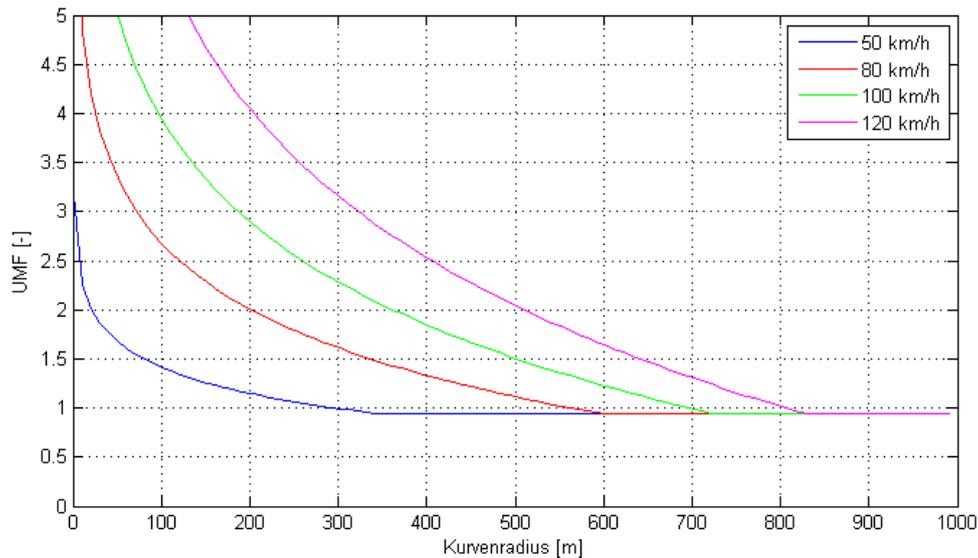


Abbildung 8: Unfallmodifikationsfaktor in Abhängigkeit des Kurvenradius und der signalisierten Geschwindigkeit.

Randbedingungen

Die folgenden, sich natürlich einstellenden Druckwirkungen werden bei der Sicherheitsbewertung berücksichtigt:

- Temperaturbedingte Druckwirkung (Auftrieb/Abtrieb): Die Temperatur im Tunnelinnern weicht in der Regel um einige Grad von der Aussentemperatur ab. Dabei können sowohl Auf- als auch Abtriebskräfte wirken. Im Mittel gleichen sich die Kräfte ungefähr aus, weshalb im Rahmen der Sicherheitsbewertung keine temperaturbedingten Druckwirkungen berücksichtigt wird.
- Druckwirkung durch Wind: Für die Winddaten wird die Messstation Freudenstadt für den Zeitraum Februar 2022 bis August 2023 verwendet. Zur Umrechnung auf das Portalniveau von ca. 5 m Höhe über Boden werden rund 50%³ dieses Wertes angesetzt. Die Windrichtungen in einem Korridor von +/- 90° Grad werden jeweils für das entsprechende Portal berücksichtigt.

³ Annahme einer logarithmischen Windverteilung über Grund mit einer dynamischen Rauigkeitslänge von 1.0 m (typischer Wert für Stadt / Grossstadt) bei einer Höhe der Messstation von 34 m.

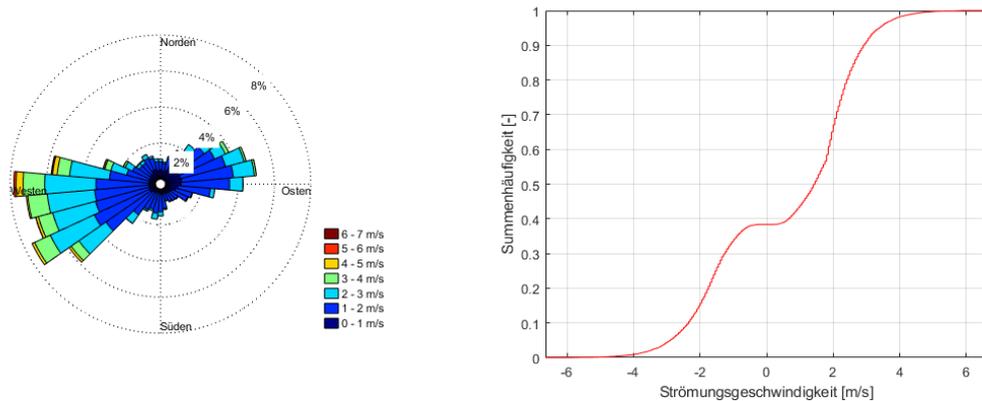


Abbildung 9: Darstellung der Windrose und der Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeit (Positives Vorzeichen Wind auf das Westportal, negatives Vorzeichen: Wind auf das Ostportal)

Tabelle 10: Randbedingungen

Randbedingung	Total Winddruck	Wahrscheinlichkeit
1	-21.5 Pa	0.08%
2	--13.0 Pa	0.85%
3	-6.6 Pa	5.78%
4	--2.4 Pa	22.37%
5	-0.3 Pa	9.30%
6	0.3 Pa	9.65%
7	2.4 Pa	37.80%
8	6.6 Pa	12.32%
9	13.0 Pa	1.73%
10	21.5 Pa	0.13%

Erfolgreiche Fremdrettung

Aufgrund des hohen Ausrüstungsstandards sowie den vorhandenen organisatorischen Massnahmen (z B. Alarm- und Gefahrenabwehrplan, SIBE) ist die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Fremdrettung hoch und wird zu 80% angenommen.

Ereignisorte

Die Ereignisorte werden so gewählt, dass in jedem homogenen Segment mindestens 1 Brandort zu liegen kommt und der Abstand zwischen den Ereignisorten höchsten 100 m beträgt.

3.2.3 Variante H4

Tabelle 11: Systemrepräsentation H4 (km 0+000 Westportal)

Segment		Verkehr					Anzahl Fahrspuren [-]	Betriebsform	
Von [m]	Bis [m]	Anzahl Zeitperioden [-]	DTV [Fz/24h]	Anteil SV [%]	Anteil Bus am SV [%]	Stau [%]			
0	50	Tag / Nacht	10'000	10.0	5.0	Gering (vgl. Tabelle 8)	2	GV	
50	132								
132	150								
150	300								
300	653								
653	753								
753	833								
833	2346								
2346	2426								
2426	2526								
2526	2615								
2615	2815								
2815	2915								
2915	2965								
Segment		Längsneigung [%]	Geometrie				Zu-/Abfahrt [-]	Kurvenradien [m]	
Von [m]	Bis [m]		Querschnitt [m²]	Umfang [m]	Breite [m]	Typ [-]			
0	50	2.50%	60.2	30	10.2	Gewölbe	Nein	400	
50	132								
132	150								
150	300	5.47%	49.5	28.8	10.2	Rechteck		Nein	200
300	653								
653	753								
753	833								
833	2346								
2346	2426								
2426	2526								
2526	2615								
2615	2815								
2815	2915								
2915	2965		60.2	30	10.2	Gewölbe		400	

Segment		Fahrspur breite [m]	Beleuch- tung [cd/m2]	Notbe- leuchtung [-]	Unfallrate [1/(Fz,km)]	Geschwindigkeit [km/h]	Alarmie- rung [-]	Zone Fahrt- richtung [-]	
Von [m]	Bis [m]							W -> O	O -> W
0	50	3.75	Norm- konform	Ja	Basisunfall- rate: 6.81E-07 UMF je homogenes Segment (vgl. nachfolgende Ausführungen)	80	Funk UKW SOS Video	2	6
50	132							3	5
132	150							4	4
150	300								
300	653								
653	753								
753	833								
833	2346								
2346	2426							5	3
2426	2526								
2526	2615								
2615	2815							6	2
2815	2915								
2915	2965								

Segment		Lüftung			Brand detektions- zeit [s]	Notaus- gänge [m]	Rand-bedin- gungen [-]	Erfolgreiche Fremdrettung
Von [m]	Bis [m]	Art [-]	Betrieb SV [-]	Strömungs- geschwin- digkeit ⁴ [m/s]				
0	50	Rauchabsaugung über Zwischendecke (vgl. Kap. 2.2.4)			180	9 NA Abstand 296.5m	10 Rand- bedingungen (vgl. Tabelle 10)	80%
50	132							
132	150							
150	300							
300	653							
653	753							
753	833							
833	2346							
2346	2426							
2426	2526							
2526	2615							
2615	2815							
2815	2915							
2915	2965							

Für die Modellierung werden die gleichen Annahmen wie bei der Variante H4 getroffen.

⁴ Positiv von Nord nach Süd

3.2.4 Variante H5

Tabelle 12: Systemrepräsentation H5 (km 0+000 Westportal)

Segment		Verkehr					Anzahl Fahrspuren [-]	Betriebsform
Von [m]	Bis [m]	Anzahl Zeitperioden [-]	DTV [Fz/24h]	Anteil SV [%]	Anteil Bus am SV [%]	Stau [%]		
0	50	Tag / Nacht	10'000	10.0	5.0	Gering (vgl. Tabelle 8)	2	GV
50	111							
111	150							
150	249							
249	300							
300	1098							
1098	1278							
1278	2019							
2019	2199							
2199	2257							
2257	2407							
2407	2506							
2506	2507							
2507	2557							

Segment		Längsneigung [%]	Geometrie				Zu-/Abfahrt [-]	Kurvenradien [m]
Von [m]	Bis [m]		Querschnitt [m²]	Umfang [m]	Breite [m]	Typ [-]		
0	50	6.0%	60.2	30	10.2	Gewölbe	Nein	650
50	111							300
111	150							∞
150	249							300
249	300							500
300	1098		300					
1098	1278		500					
1278	2019		300					
2019	2199		∞					
2199	2257							
2257	2407							
2407	2506	2.50%	60.2	30	10.2	Gewölbe		
2506	2507							
2507	2557							

Segment		Fahrspur breite [m]	Beleuch- tung [cd/m ²]	Notbe- leuchtung [-]	Unfallrate [1/(Fz,km)]	Geschwindigkeit [km/h]	Alarmie- rung [-]	Zone Fahrt- richtung [-]	
Von [m]	Bis [m]							W -> O	O -> W
0	50	3.75	Norm- konform	Ja	Basisunfall- rate: 6.81E-07 UMF je homogenes Segment (vgl. nachfolgende Ausführungen)	80	Funk UKW SOS Video	2	6
50	111							3	5
111	150							4	4
150	249								
249	300								
300	1098								
1098	1278								
1278	2019								
2019	2199							5	3
2199	2257								
2257	2407								
2407	2506							6	2
2506	2507								
2507	2557								

Segment		Lüftung			Brand detektions- zeit [s]	Notaus- gänge [m]	Rand-bedin- gungen [-]	Erfolgreiche Fremdrettung
Von [m]	Bis [m]	Art [-]	Betrieb SV [-]	Strömungs- geschwin- digkeit ⁵ [m/s]				
0	50	Rauchabsaugung über Zwischendecke (vgl. Kap. 2.2.4)			180	8 NA Abstand 284 m	10 Rand bedingungen (vgl. Tabelle 10)	80%
50	111							
111	150							
150	249							
249	300							
300	1098							
1098	1278							
1278	2019							
2019	2199							
2199	2257							
2257	2407							
2407	2506							
2506	2507							
2507	2557							

Für die Modellierung werden die gleichen Annahmen wie bei der Variante H2 getroffen, mit folgender Abweichung:

- Verkehrsknoten Ostportal: Es ist nur vor dem Ostportal ein Kontenpunkt vorgesehen. Zur Modellierung dieser besonderen Charakteristik wird auf den ersten 150 m am Ostportal (Bereich der Haltesichtweite) ein UMF von 1.44 angesetzt (Verhältnis der Unfallrate mit Zu-/Abfahrt im Vergleich ohne Zu-/Abfahrt gemäss Heft B66: $9.81 / 6.81 = 1.44$).

⁵ Positiv von Nord nach Süd

3.2.5 Referenzvariante RABT

Die Referenzvarianten RABT entsprechen jeweils den Varianten H2, H4 und H5, jedoch ohne besondere Charakteristiken. Im Vergleich zu den Varianten KAT ergeben sich im Wesentlichen folgende Differenzen:

- Längsneigung: max. 3%
- Haltesichtweiten: Kurvenradius mind. 500 m
- Verkehrsknoten: Kein Verkehrsknoten vor den Portalen, UMF von 1.

3.3 Risikoermittlung Planungsstand (M0)

3.3.1 Risikoanalyse

Summenkurven

Aus den Ergebnissen der Risikoermittlung ergibt sich für die Ortsumfahrung Schramberg ein einheitliches, charakteristisches Bild.

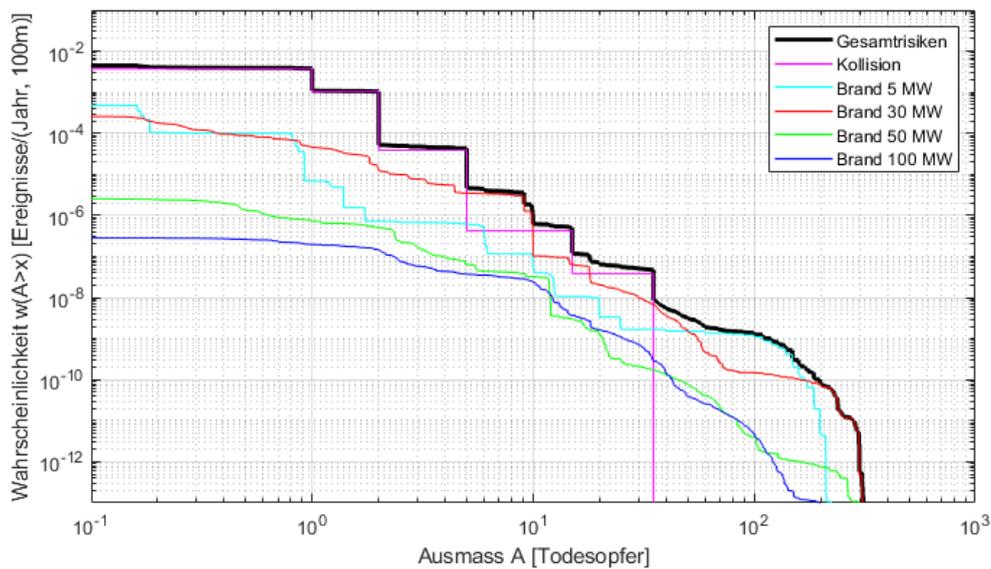


Abbildung 10: Summenkurven Risiken Variante H2

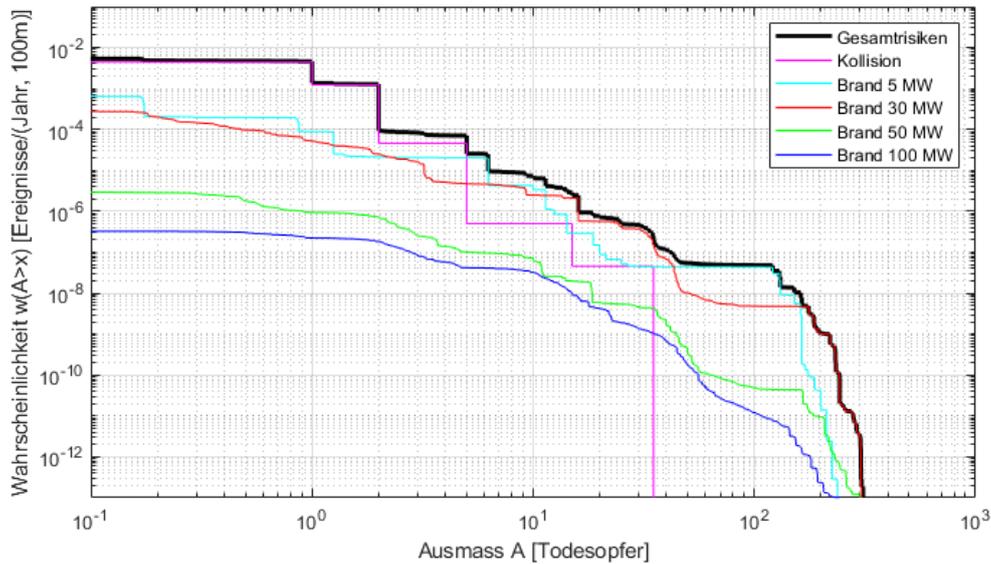


Abbildung 11: Summenkurven Risiken Variante H4

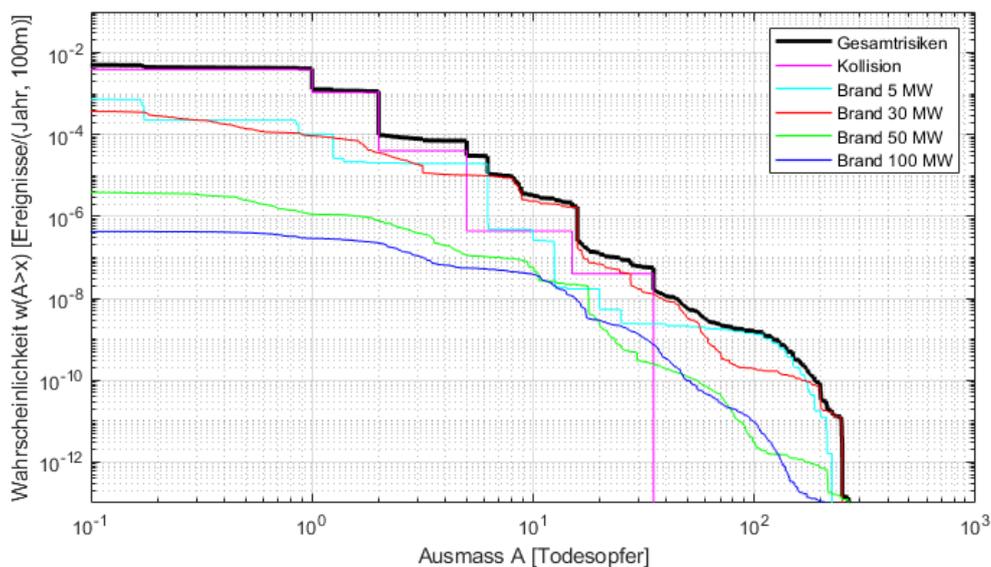


Abbildung 12: Summenkurven Risiken Variante H5

Bis zu einem Ausmass von ca. fünf Todesopfern dominieren die Kollisionsrisiken. Bei den Brandrisiken ist ersichtlich, dass die Eintretenshäufigkeit mit steigender Brandleistung stark abnimmt. Zugleich steigt dabei das Schadensausmass mit höherer Brandleistung an. Die hohen Ausmasse resultieren aufgrund den Stausituationen.

Schadenerwartungswerte

Neben der Darstellung der Summenkurve können die Risiken auch als Schadenerwartungswert ausgedrückt werden. Der Schadenerwartungswert beschreibt als Integral der Summenkurven den jeweiligen Risikoerwartungswert der einzelnen Varianten.

Tabelle 13: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H2

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H2	4.8792E-03	1.6031E-04	1.8808E-04	3.0188E-06	8.4299E-07	5.2315E-03
RABT _{H2}	3.5611E-03	1.1127E-04	1.2584E-04	2.0530E-06	6.1703E-07	3.8009E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H2	2.0184E-01	1.6109E-04	1.0343E-03	3.0542E-05	5.2314E-06	2.0307E-01
RABT _{H2}	1.4731E-01	1.1157E-04	6.7410E-04	2.2138E-05	3.7333E-06	1.4813E-01

Tabelle 14: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H4

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H4	5.7982E-03	4.2256E-04	2.4692E-04	4.3231E-06	1.1031E-06	6.4731E-03
RABT _{H4}	3.9848E-03	2.7630E-04	1.6550E-04	2.9597E-06	8.0002E-07	4.4303E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H4	2.3986E-01	4.3307E-04	1.4990E-03	3.5868E-05	5.8941E-06	2.4183E-01
RABT _{H4}	1.6484E-01	2.8210E-04	9.6735E-04	2.3918E-05	4.0690E-06	1.6612E-01

Tabelle 15: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H5

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H5	5.1223E-03	4.2710E-04	3.5820E-04	5.2606E-06	1.3464E-06	5.9142E-03
RABT _{H5}	3.6623E-03	3.2932E-04	2.5855E-04	3.8169E-06	1.0203E-06	4.2550E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H5	2.1190E-01	4.3126E-04	1.4870E-03	4.5227E-05	7.5300E-06	2.1387E-01
RABT _{H5}	1.5150E-01	3.3260E-04	1.0538E-03	3.2024E-05	5.3844E-06	1.5292E-01

3.3.2 Risikobewertung (M0)

Die Risikobewertung erfolgt anhand der Schadenerwartungswerte je Variante. Die Risiken werden getrennt nach Kollisions-, Brand- und Gesamtrisiken dargestellt.

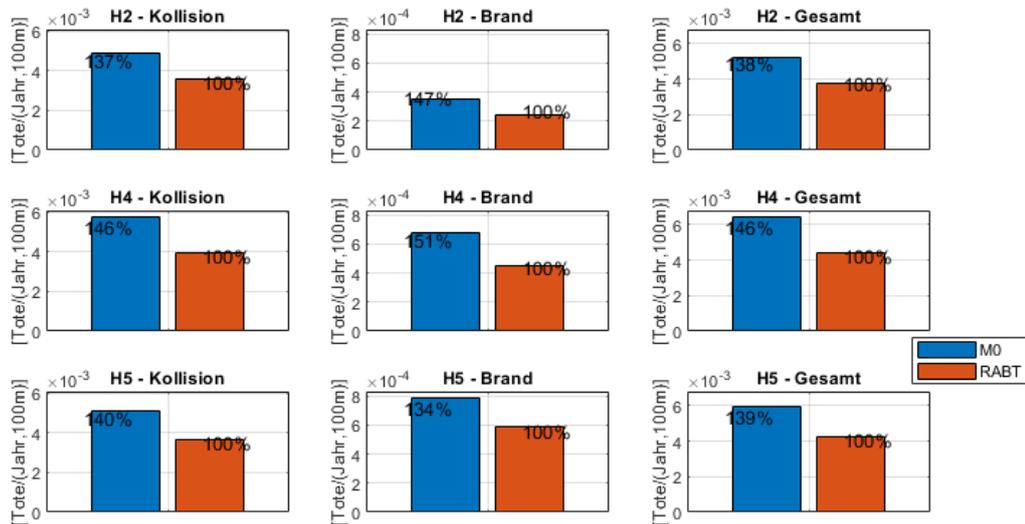


Abbildung 13: Übersicht Schadenerwartungswerte Tote für Kollisions-, Brand- und Gesamtrisiken gemäss derzeitigem Planungsstand

Die Risikoanalyse des derzeitigen Planungsstand zeigt folgende Ergebnisse auf:

- Alle Varianten weisen eine ähnliche Risikocharakteristik bezogen auf 100 m auf.
- Die besonderen Charakteristiken der OU Schramberg führen zu einer Risikoerhöhung der Kollisions- und Brandrisiken. Ohne kompensatorische Massnahmen liegt das Risiko über dem RABT-Referenzniveau.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass gemäss derzeitigem Planungsstand kein hinreichendes Sicherheitsniveau vorliegt. Es sind kompensatorische Massnahmen vorzusehen.

3.4 Massnahmenplanung

3.4.1 Risikoreduzierende Massnahmen

Es werden folgende, kompensatorische Massnahmen und deren Kombinationen beurteilt:

- MNA: Verdichtete Notausgänge in einem Abstand von max. 150 m
- MRM: Anordnung einer zusätzlichen Meldekette für die Brandmeldeanlage in Form von Rauchmelder in einem Abstand von 100 m. Dadurch wird die Branddetektionszeit auf 60 s verkürzt.
- MGES: Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf 60 km/h

Weitere sinnvolle Massnahmen werden gemäss gegenwärtiger Planungsstufe nicht erkannt.

Hinweis: Auf die Ermittlung eines Kosten-/Wirksamkeitsverhältnis wird zunächst verzichtet, da die Massnahmen zur Erreichung eines hinreichenden Sicherheitsniveaus ungeachtet der Kosten erforderlich sind.

3.4.2 Risikoermittlung nach Massnahmen

Die Risikoermittlung erfolgt wiederum anhand den Schadenerwartungswerten.

Tabelle 16: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H2

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H2	4.8792E-03	1.6031E-04	1.8808E-04	3.0188E-06	8.4299E-07	5.2315E-03
H2: MNA	4.8792E-03	1.5239E-04	9.8381E-05	1.9733E-06	4.2754E-07	5.1324E-03
H2: MRM	4.8792E-03	1.5324E-04	9.6511E-05	1.8031E-06	5.6019E-07	5.1313E-03
H2: MGES	1.3899E-03	8.5178E-05	8.1537E-05	1.3846E-06	4.2139E-07	1.5584E-03
H2: MNA,MRM	4.8792E-03	1.4923E-04	6.9750E-05	1.3842E-06	2.9221E-07	5.0999E-03
H2: MNA,MRM,MGES	1.3899E-03	7.7442E-05	3.4798E-05	7.0319E-07	1.5317E-07	1.5030E-03
RABT _{H2}	3.5611E-03	1.1127E-04	1.2584E-04	2.0530E-06	6.1703E-07	3.8009E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H2	2.0184E-01	1.6109E-04	1.0343E-03	3.0542E-05	5.2314E-06	2.0307E-01
H2: MNA	2.0184E-01	1.5276E-04	1.2793E-04	1.0988E-05	5.2241E-06	2.0214E-01
H2: MRM	2.0184E-01	1.5375E-04	5.6133E-04	2.0604E-05	3.9883E-06	2.0258E-01
H2: MGES	7.6660E-02	8.5583E-05	4.6859E-04	1.5952E-05	2.7851E-06	7.7233E-02
H2: MNA,MRM	2.0184E-01	1.4926E-04	8.4970E-05	7.4087E-06	3.9882E-06	2.0209E-01
H2: MNA,MRM,MGES	7.6660E-02	7.7457E-05	4.2871E-05	3.8194E-06	2.1022E-06	7.6787E-02
RABT _{H2}	1.4731E-01	1.1157E-04	6.7410E-04	2.2138E-05	3.7333E-06	1.4813E-01

Tabelle 17: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H4

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H4	5.7982E-03	4.2256E-04	2.4692E-04	4.3231E-06	1.1031E-06	6.4731E-03
H4: MNA	5.7982E-03	1.7931E-04	1.2552E-04	2.4890E-06	5.2892E-07	6.1060E-03
H4: MRM	5.7982E-03	1.9789E-04	1.4991E-04	2.6724E-06	7.0447E-07	6.1493E-03
H4: MGES	1.4230E-03	1.6752E-04	9.7241E-05	1.6735E-06	4.9484E-07	1.6899E-03
H4: MNA,MRM	5.7982E-03	1.7322E-04	8.9071E-05	1.7126E-06	3.5115E-07	6.0625E-03
H4: MNA,MRM,MGES	1.4230E-03	7.2410E-05	3.8416E-05	7.6506E-07	1.6122E-07	1.5348E-03
RABT _{H4}	3.9848E-03	2.7630E-04	1.6550E-04	2.9597E-06	8.0002E-07	4.4303E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H4	2.3986E-01	4.3307E-04	1.4990E-03	3.5868E-05	5.8941E-06	2.4183E-01
H4: MNA	2.3986E-01	1.8329E-04	3.2965E-04	1.9025E-05	5.8471E-06	2.4039E-01
H4: MRM	2.3986E-01	2.0237E-04	1.0231E-03	2.6860E-05	4.6499E-06	2.4111E-01
H4: MGES	7.8489E-02	1.7089E-04	5.1306E-04	1.5906E-05	2.7944E-06	7.9192E-02
H4: MNA,MRM	2.3986E-01	1.7424E-04	2.4375E-04	1.2447E-05	4.5935E-06	2.4029E-01
H4: MNA,MRM,MGES	7.8489E-02	7.2760E-05	1.0768E-04	5.1535E-06	2.0203E-06	7.8677E-02
RABT _{H4}	1.6484E-01	2.8210E-04	9.6735E-04	2.3918E-05	4.0690E-06	1.6612E-01

Tabelle 18: Schadenerwartungswert für die untersuchten Variante H5

Variante	Schadenerwartungswert [Todesopfer / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H5	5.1223E-03	4.2710E-04	3.5820E-04	5.2606E-06	1.3464E-06	5.9142E-03
H5: MNA	5.1223E-03	2.0161E-04	1.5385E-04	3.0171E-06	6.7501E-07	5.4815E-03
H5: MRM	5.1223E-03	2.0340E-04	1.8827E-04	3.4688E-06	9.0247E-07	5.5184E-03
H5: MGES	1.4371E-03	2.0207E-04	1.8023E-04	2.5652E-06	6.8216E-07	1.8227E-03
H5: MNA,MRM	5.1223E-03	1.9666E-04	9.9633E-05	2.0760E-06	4.4442E-07	5.4212E-03
H5: MNA,MRM,MGES	1.4371E-03	1.1126E-04	5.3265E-05	1.0997E-06	2.3388E-07	1.6030E-03
RABT _{H5}	3.6623E-03	3.2932E-04	2.5855E-04	3.8169E-06	1.0203E-06	4.2550E-03
Verletzte						
Variante	Schadenerwartungswert [Verletzte / (Jahr, 100m)]					
	Kollision	Brand 5 MW	Brand 30 MW	Brand 50 MW	Brand 100 MW	Gesamtrisiko
H5	2.1190E-01	4.3126E-04	1.4870E-03	4.5227E-05	7.5300E-06	2.1387E-01
H5: MNA	2.1190E-01	2.0239E-04	2.0225E-04	1.2655E-05	7.2810E-06	2.1232E-01
H5: MRM	2.1190E-01	2.0488E-04	8.5920E-04	3.0470E-05	5.6256E-06	2.1300E-01
H5: MGES	7.9266E-02	2.0397E-04	7.9008E-04	2.3196E-05	3.8216E-06	8.0287E-02
H5: MNA,MRM	2.1190E-01	1.9674E-04	1.2127E-04	6.1038E-06	4.6599E-06	2.1223E-01
H5: MNA,MRM,MGES	7.9266E-02	1.1130E-04	6.4829E-05	3.2546E-06	2.4218E-06	7.9448E-02
RABT _{H5}	1.5150E-01	3.3260E-04	1.0538E-03	3.2024E-05	5.3844E-06	1.5292E-01

3.4.3 Risikobewertung nach Massnahmen

Die Risikobewertung nach Massnahmen führt zu folgendem Bild:

- Mittels einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h wird im Hinblick auf die Gesamtrisiken grundsätzlich für alle drei betrachtenden Varianten ein hinreichendes Sicherheitsniveau prognostiziert. Dies betrifft sowohl die Brand- als auch die Kollisionsrisiken. Die Kollisionsrisiken sind jedoch im Sinne der Gesamtrisiken dominierend.
- Im Hinblick auf die Brandrisiken zeigt sich jedoch auch die starke Wirksamkeit der Fluchtwegverdichtung und der verdichteten Anordnung von Kaltrauchdetektoren. Gegenüber dem RABT-Referenzstunnel können die mit Brandereignissen verbundenen Risiken massgeblich gesenkt werden.

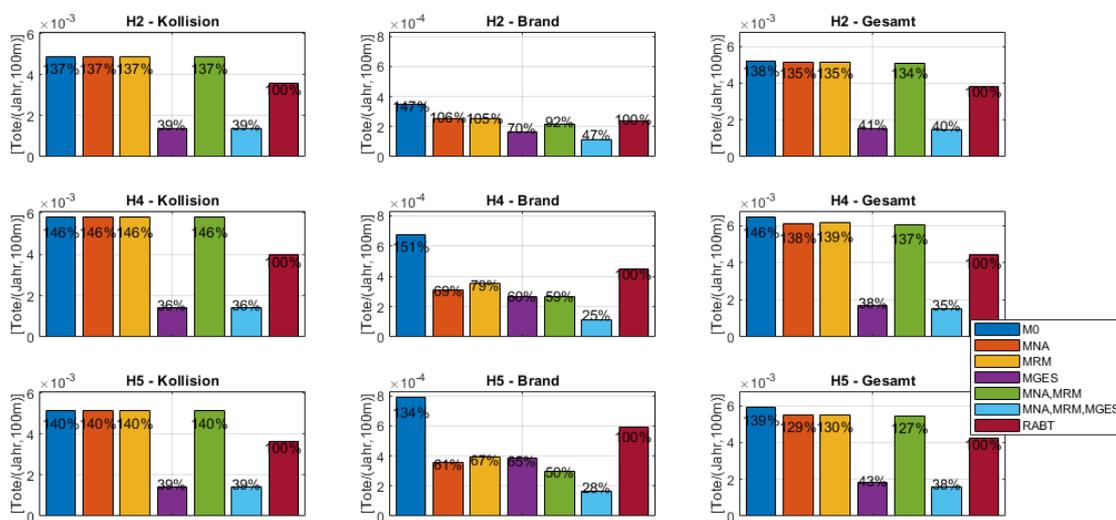


Abbildung 14: Übersicht Schadenerwartungswerte Tote für Kollisions-, Brand- und Gesamtrisiken nach Massnahmen

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Schlussfolgerungen

Die Handlungsempfehlungen beziehen sich zunächst ausschliesslich auf die Personensicherheit der Verkehrsteilnehmer. Andere Aspekte (wie beispielsweise die des Unterhalts oder in Bezug auf bereits projektierte Massnahmen) sind nicht Gegenstand der risikoanalytischen Untersuchung.

Die Sicherheitsbewertung führt zu folgenden Ergebnissen:

- Mittels einer Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h wird grundsätzlich ein hinreichendes Sicherheitsniveau prognostiziert. Die Geschwindigkeitsreduktion stellt eine betriebliche Massnahme dar. Die Prognoseunsicherheit ist durch den Einfluss der Verkehrsteilnehmer im Vergleich zu anderen Sicherheitsmassnahmen, wie Brandlüftung oder Verdichtung der Fluchtwege, tendenziell höher. Insofern sind zur Stabilisierung des Sicherheitsniveaus weitere, robust wirkende Sicherheitsmassnahmen zu ergreifen.
- Die Fluchtwegverdichtung und die rasche Branddetektion (z.B. mittels Kaltrauchdetektoren) senken die Brandrisiken massgeblich. Deren planerische Umsetzung ist zum Erreichen eines hinreichenden Sicherheitsniveaus erforderlich.
- Die Trassierung ist im Zuge der weiteren Planung zu optimieren bzw. die Abweichungen objektspezifisch zu begründen.

Randbedingungen für die weitere Planung

Für die weitere Planung kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass die mit den vorgestellten Planungsvarianten H2, H4, H5 verbundenen besonderen Charakteristiken (wie z.B. Steigung über 3%) mit entsprechenden zusätzlichen Sicherheitsmassnahmen kompensiert werden können.

Es ist davon auszugehen, dass zur Kompensation mindestens die folgenden Massnahmen zu ergreifen sind:

- Geschwindigkeitsreduktion auf 60 km/h (ggf. sind auch 70 km/h denkbar – wäre noch zu untersuchen).
- Fluchtwegverdichtung auf einen maximalen Abstand von 150 m.
- Schnelle Branddetektion (60 s) über eine verdichtete Anordnung von Kaltrauchdetektoren.
- Regelung der Längslüftung im Brandfall mittels PID-Regler (FU- gesteuerte Strahlventilatoren).

Restrisiko

Ungeachtet des Akzeptanzniveaus des ermittelten Risikos verbleibt auch für die Ortumfahrung Schramberg die Möglichkeit, dass sich ein Ereignis mit hohem Ausmass tatsächlich realisiert. Insbesondere bei den mit sehr tiefen Eintrittswahrscheinlichkeiten verbundenen Ereignissen mit Bussen, kann auch ein sehr grosses Schadensausmass nicht ausgeschlossen werden. Diese Ereignisse haben somit ein grosses Aversionspotential. Allerdings ist die Wahrscheinlichkeit dafür so gering, dass das Risiko als allgemein akzeptiert gelten kann.

Nabla Ingenieure Deutschland GmbH

Axel Bassler

Qualitätssicherung

Roman Felix

Quellenverzeichnis

Richtlinien und Normen

- [1] Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten RE-ING Teil 3 Tunnel, Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Stand 2023/03
- [2] Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT-80/100), Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2019
- [3] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT), Ausgabe 2006
- [4] Verfahren zur Kategorisierung von Strassentunneln gemäss ADR 2007; FE 03.0437/2007/FRB FE86.0050/2008, Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST), BUNG Ingenieure AG, Ernst Basler + Partner, Planung Transport Verkehr AG (PTV), Schlussbericht Oktober 2009.
- [5] Verfahren zur Kategorisierung von Strassentunneln gemäss ADR 2007; FE 03.0437/2007/FRB FE86.0050/2008, Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST), BUNG Ingenieure AG, Ernst Basler + Partner, Planung Transport Verkehr AG (PTV), Schlussbericht Anhang Oktober 2009.
- [6] ASTRA 89005, Risikokzept für Tunnel der Nationalstrasse, Ausgabe 2014, Version 1.0
- [7] ASTRA 19004, Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrasse, Ausgabe 2014, Version 1.0
- [8] ASTRA 13001, Lüftung der Strassentunnel, Ausgabe 2008, Version 2.03
- [9] B66, Bewertung der Sicherheit von Strassentunnel, FE 03.0378/2004/FRB, Bundesanstalt für Strassenwesen (BAST), Erscheinungsjahr 2009
- [10] Fire Guard: Fire Guard - Verhalten im Brandfall, Gerätetest im Runehamar Testtunnel Norwegen, Bericht, September 2007

Projektunterlagen

- [11] Nabla Engineering, B462 OU Schramberg – Rappenfelsentunnel, Sicherheitstechnische Risikoanalyse nach RABT und EABT-80/100, Version 0.2 vom 25.09.2019
- [12] Nabla Engineering, B462 OU Schramberg – Paradiesbergtunnel, Sicherheitstechnische Risikoanalyse nach RABT und EABT-80/100, Version 0.2 vom 25.09.2019
- [13] BUNG Ingenieure GmbH, Abrechnungsgrenzen Rettungstollen, Vorabzug 11.07.2023
- [14] BUNG Ingenieure GmbH, Regelquerschnitt 2-spurig mit und ohne Zwischendecke, Vorabzug 31.01.2023
- [15] BUNG Ingenieure GmbH, B 462 OU Schramberg, Lageplan DTV-Karte Var. H3, K1, H4, H5, H2, H4 Varianten Übersicht, Arbeitsstand 24.07.2023
- [16] BUNG Ingenieure GmbH, B 462 OU Schramberg, Höhenplan Variante H2 modifiziert EKL 2 Achse 1013, Arbeitsstand 24.07.2023
- [17] BUNG Ingenieure GmbH, B 462 OU Schramberg, Höhenplan Variante H4 modifiziert EKL 2 Achse 1130, Arbeitsstand 30.05.2023

- [18] BUNG Ingenieure GmbH, B 462 OU Schramberg, Höhenplan Variante H5 modifiziert EKL 2 Achse 1081, Arbeitsstand 24.07.2023
- [19] E-Mails zwischen Nabla und Regierungspräsidium Freiburg – Referat 44, 2023

Anhang A

Kurzbeschreibung der Methodik

1 Methodik

1.1 Übersicht

Der prinzipielle Aufbau sowohl einer qualitativen als auch einer quantitativen Sicherheitsbewertung ist identisch und besteht im Wesentlichen aus drei, miteinander interagierenden, Elementen (vgl.

Abbildung 1):

- Risikoanalyse
In der Risikoanalyse werden zunächst die Gefahren identifiziert. Basierend auf dieser Analyse werden Szenarien definiert, welche die vorher erkannten Gefahren geeignet abbilden. Für jedes Szenario werden anschliessend die Ereignishäufigkeit des Szenarios und das dazugehörige Schadensausmaß, in der Regel Todesopfer, ermittelt. Mit diesen beiden Werten, Häufigkeit und Schadensausmaß, lässt sich das Risiko ermitteln und darstellen.
- Risikobewertung
Die aus der Risikoanalyse ermittelten Risiken werden verwendet, um anhand von Bewertungskriterien zu entscheiden, ob die Sicherheit des Tunnels ausreichend ist.
- Massnahmenplanung
In der Massnahmenplanung werden geeignete Sicherheitsmassnahmen eruiert, um mithilfe dieser die Beurteilungskriterien der Risikobewertung zu erfüllen. Um die Verhältnismässigkeit der eingesetzten, finanziellen Mittel zu gewährleisten, werden die Massnahmen aufgrund ihrer Kostenwirksamkeit beurteilt. Es sollen nur die Sicherheitsmassnahmen realisiert bzw. geprüft werden, die ein hinreichendes Kostenwirksamkeitsverhältnis aufweisen.

Mit einer quantitativen Sicherheitsbewertung werden die Risiken quantitativ, zahlenmässig erfasst, d. h. die Häufigkeiten und das dazugehörige Schadensausmass werden rechnerisch, in Zahlen, ermittelt. Im Gegensatz dazu werden bei einer qualitativen Sicherheitsbewertung die Risiken nur qualitativ eingeschätzt.

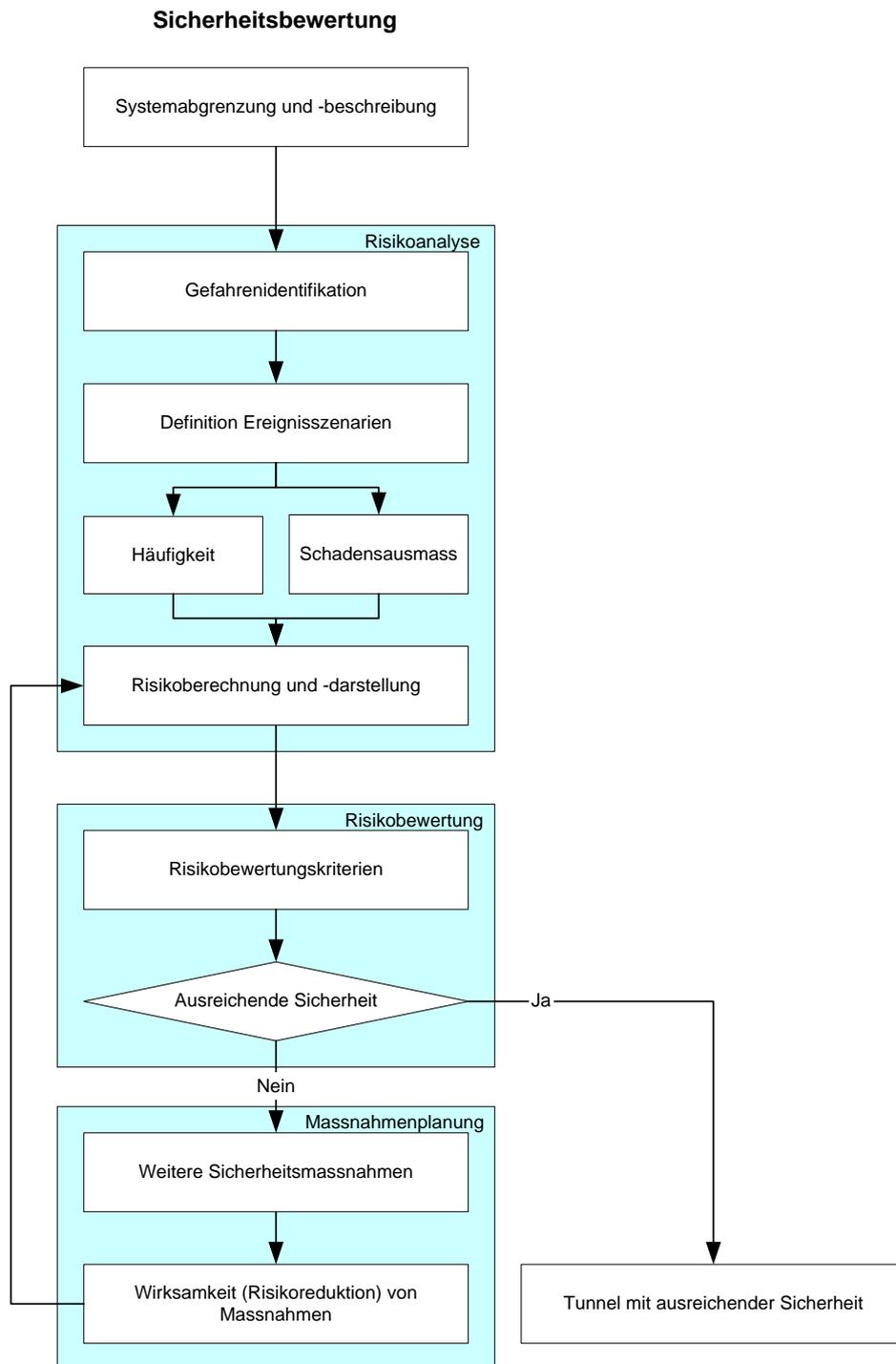


Abbildung 1 Elemente der risikoorientierten Sicherheitsbewertung (aus [5])

1.1.1 Ereignishäufigkeiten

Die Quantifizierung der objektspezifischen Risiken erfordert in einem ersten Schritt die Generierung von Ereignisabläufen zur Häufigkeitsermittlung. Ausgehend vom Initialereignis (z. B. Unfall eines Personenwagens) werden für das jeweilige Szenario die Abläufe der Folgeereignisse mit Hilfe von

Ereignisbäumen berechnet. Der mögliche Ereignisablauf wird mit Verzweigungen dargestellt, wobei für jede dieser Verzweigungen im Ereignisbaum die bedingten Wahrscheinlichkeiten aus den Eingabeparametern errechnet oder aus den Vorgaben¹ im Programm eingesetzt werden. Im Grunde genommen definiert jeder Weg im Ereignisbaum ein separates Szenario. Das Ausgangsszenario wird somit in "Unterszenarien" zerlegt, für welche das Ausmaß (Todesopfer) separat errechnet wird. Durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten entlang eines Weges durch den Ereignisbaum wird die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein "Unterszenario" errechnet.

Folgende Verzweigungen werden im RA-Modell NabraRisk für den Szenariotyp Kollision (ohne Brand) berücksichtigt:

- Häufigkeit des Initialereignisses Kollision
Beim Initialereignis handelt es sich um die, für einen bestimmten Tunnel zu erwartende Häufigkeit, mit welcher eine Kollision stattfindet.

Häufigkeit einer Kollision in der betrachteten Tunnelröhre [1/Jahr]:

$$\text{HäufigkeitKollision} = 365 \times \text{DTV} \times \text{Tunnellänge} \times \text{Unfallrate}$$

Die Häufigkeit einer Kollision ergibt sich direkt aus der Unfallrate und ist proportional zur Tunnellänge und dem Verkehrsaufkommen.

- Ereignisort:
Aufgrund der über die Tunnellänge unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften (z. B. Längsneigung) ergibt sich eine Unfallrate, die über die Tunnellänge bzw. in den verschiedenen Ereignisorten variiert.
- Zeitperiode:
In Abhängigkeit des Ereigniszeitpunkts befinden sich aufgrund des tageszeitlichen Verlaufs des Verkehrsaufkommens unterschiedlich viele Fahrzeuge im Tunnel. Dies führt bei Indikatoren zu besonderen Charakteristiken zu einer über die verschiedenen Zeitperioden variierende Unfallrate.
- Unfalltyp 1/3/6/7
Je nach Art und Verlauf der Kollision resultieren unterschiedliche Personenschäden.
- Verteilung Schadensausmass:
Je nach Verlauf und spezifischen Umständen bei einer Kollision können unterschiedliche Schadenfolgen resultieren.

Folgende Verzweigungen werden im RA-Modell NabraRisk für den Szenariotyp Brand (ohne Gefahrgüter gemäss ADR) berücksichtigt:

- Initialereignis:
Beim Initialereignis handelt es sich um die, für einen bestimmten Tunnel zu erwartende Häufigkeit, mit welcher ein Brand mit einer spezifischen Brandlast auftritt.
Häufigkeit eines Brandes in der betrachteten Tunnelröhre [1/Jahr]:
 - $\text{HäufigkeitBrand} = 365 \times \text{DTV} \times \text{Tunnellänge} \times (\text{Unfallrate} \times \text{BrandrateKollision} + \text{BrandrateTechn.Defekt}) \times \text{WahrscheinlichkeitBrandlast}$

¹ Die Wahrscheinlichkeiten sind verschiedenen Forschungsberichten sowie Erfahrungswerten entnommen.

Ein Brand im Tunnel tritt infolge einer Kollision oder eines technischen Defekts auf. Die BrandrateKollision bezeichnet dabei die Wahrscheinlichkeit eines Brandes infolge einer Kollision und kann mit 0.3 % geschätzt werden [4]. Die BrandrateTechn.Defekt berücksichtigt die Wahrscheinlichkeit eines Brandes aufgrund eines Technischen Defektes und wird zu 3×10^{-9} [1/(Fahrzeug, km)] angenommen. Der Faktor WahrscheinlichkeitBrandlast berücksichtigt, dass geringe Brandlasten im Tunnel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit auftreten, bedingt entsteht ein Brand:

- 5 MW: 90.0 %
- 30 MW: 9.90 %
- 50 MW: 0.09 %
- 100 MW: 0.01 %

- Ereignisort:
Neben der variierenden Unfallrate unterscheiden sich die verschiedenen Ereignisorte, z. B. Portalbereiche, insbesondere hinsichtlich Personenexposition und Fluchtmöglichkeiten und damit auch hinsichtlich des potenziellen Schadenausmaßes.
- Zeitraum (Tag/Nacht):
Neben der variierenden Unfallrate befinden sich in Abhängigkeit des Ereigniszeitpunkts aufgrund des tageszeitlichen Verlaufs des Verkehrsaufkommens unterschiedlich viele Fahrzeuge und somit Personen im Tunnel.
- Verkehrszustand (Normal/Stau):
Ob sich ein Brand im normalen Verkehr oder bei Stau oder stockendem Verkehr ereignet, hat in erster Linie auf die Zahl der exponierten/gefährdeten Personen bzw. die Lüftung und damit auf das potenzielle Schadensausmass einen Einfluss.
- Detektionszeit:
Es können unterschiedliche Detektionszeiten eines Brandes berücksichtigt werden.
- Technischer Defekt Lüftung:
Bei Ausfall der Lüftung steht nur noch eine natürliche Entrauchung zur Verfügung.
- Technischer Defekt Alarm:
Bei Ausfall der Alarmierung beginnt die Flucht der Verkehrsteilnehmer zu einem späteren Zeitpunkt.
- Aufgeprägte Randbedingungen vor Brandbeginn:
Windverhältnisse und Verkehrsaufkommen beeinflussen die Strömungsverhältnisse vor Brandbeginn und damit auch die Verrauchungssituation in den ersten Minuten nach Brandbeginn.
- Erfolgreiche Fremdrettung:
Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmasses beitragen.

1.1.2 Schadensausmass

Neben der Generierung von Ereignisabläufen zur Häufigkeitsermittlung erfordert die Quantifizierung der objektspezifischen Risiken in einem zweiten Schritt die Ermittlung von Schadensausmassen. Als Schadenindikator wird die Anzahl Todesopfer verwendet. Genauer werden folgende Wirkbereiche, in Abhängigkeit des betrachteten Unterszenarios, unterschieden:

- Kollision:
Das Schadensausmaß wurde auf Grundlage statistischer Auswertungen ermittelt. Dabei wurden im Zuge der Unfallanalyse die Schadensausmassverteilungen für die vier massgeblichen Unfalltypen 1, 3, 6, und 7 ausgewertet und in Schadensausmassklassen (0, 1, 2, 5, 15 bzw. 35 Todesopfer) eingeteilt.
- Brand (ohne Gefahrgüter gemäss ADR):
Für die Ermittlung des Schadensausmaßes werden 1D-Simulationsmodelle verwendet:
 - Strömungsgeschwindigkeit: Die Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnelfahrraum werden mittels eindimensionalen, instationären Strömungsgleichungen ermittelt. Dabei wird neben den geometrischen Eigenschaften insbesondere auch das Lüftungssystem in Abhängigkeit des Brandorts explizit berücksichtigt.

Der brandthermische Auftrieb wird zusätzlich über die 1-D Energiegleichung zur Bilanzierung der für die Temperaturen im Tunnel relevanten Wärmeströme gelöst. Der Brand selbst wird als Wärmequelle mit zeitlich variabler Brandleistung modelliert.

Für die Verkehrsmodellierung wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge stromabwärts des Brandorts den Tunnel ungehindert verlassen können, während dessen sich die Fahrzeuge stromaufwärts des Brandorts stauen. Nach erfolgter Branddetektion wird der Tunnel durch ein Lichtsignal / Schranke gesperrt, sodass grundsätzlich, mit Ausnahme eines Nachlaufs, keine Fahrzeuge mehr in den Tunnel einfahren. Die Zeitspanne bis zur Branddetektion ist abhängig von den vorhandenen Detektionseinrichtungen.

Das im RA-Modell NabraRisk verwendete 1-D Strömungssimulationsmodell wurde anhand des speziell für Tunnelsysteme entwickelten, kommerziell verfügbaren Simulationsprogramm „IDA Tunnel“ validiert.

- Rauchausbreitung: Die Rauchausbreitung resultiert aus der Superposition der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelfahrraum und der Geschwindigkeit der Rauchfront, die durch den Temperaturunterschied zwischen der heissen Rauchgasschicht und der kalten Tunnelluft getrieben wird (vgl. [12])

Die Rauchausbreitung wurde anhand der experimentellen Brandversuche im Memorial Tunnel validiert (vgl. [13]).

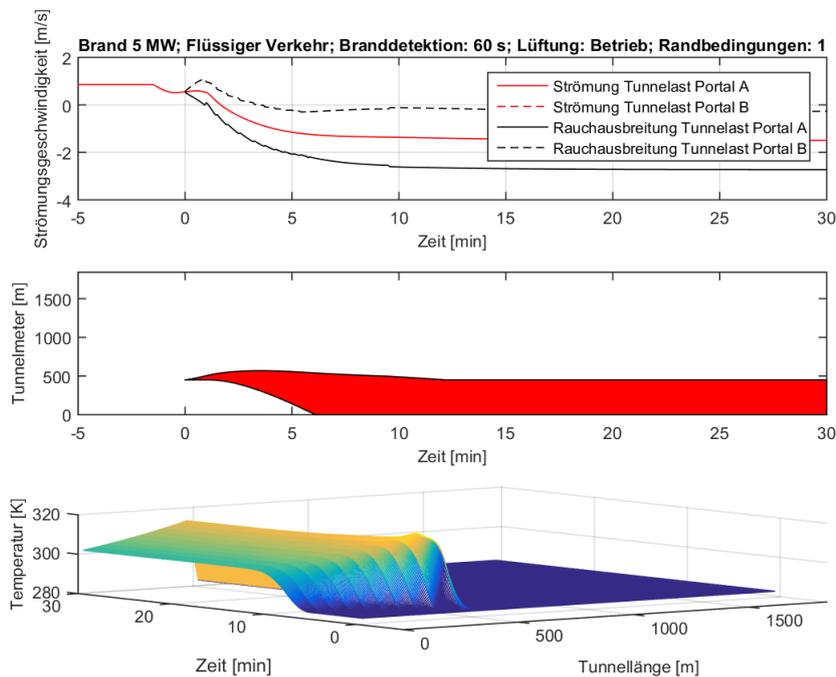


Abbildung 2 Exemplarische Strömungs- und Rauchgassimulation

- Fluchtwegsimulation: Für die Fluchtwegsimulation wird ein verhaltensbasiertes Verfahren eingesetzt, d. h., vom Startpunkt aus wird der Rettungsweg der einzelnen Personen in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten ermittelt. Die Rettungswegzeit setzt sich dabei aus drei Zeitschritten zusammen:

$$t_{\text{evac}} = t_{\text{cue}} + t_{\text{pre}} + t_{\text{mov}}$$

t_{cue} (cue time) bezeichnet dabei die Zeitspanne zwischen dem Ereignis und einem Zustand, bei dem eine Evakuierung eingeleitet wird bzw. bis eine Gefährdung erkannt wird. Diese Zeit berechnet sich entweder aus der Zeitspanne, bis der Brand detektiert wird und demnach die Alarmierung beginnt, oder aus der Zeitspanne, bis die Rauchgase die Verkehrsteilnehmer erreichen. Die kürzeste der beiden Zeiten wird verwendet.

t_{pre} (pre-movement time) bezeichnet die Zeitspanne zwischen einem Zustand, bei dem eine Evakuierung eingeleitet wird, und dem Fluchtbeginn der Verkehrsteilnehmer. Für die Bestimmung der Zeit wird ein "occupant response model" verwendet. In das Modell fließen unter anderem Verkehrseigenschaften, vorhandene Alarmierungsmöglichkeiten und die Distanz zum Unfallort mit ein.

t_{mov} (movement time) ist die Zeitspanne zwischen Fluchtbeginn und dem Erreichen des Notausgangs. Dabei können die Verkehrsteilnehmer die Fluchtrichtung wechseln, sobald sie den Rauch sehen können. Die Fluchtgeschwindigkeit selbst ergibt sich aus der Sichtweite bzw. der Rauchgaskonzentration (vgl. Abbildung 3).

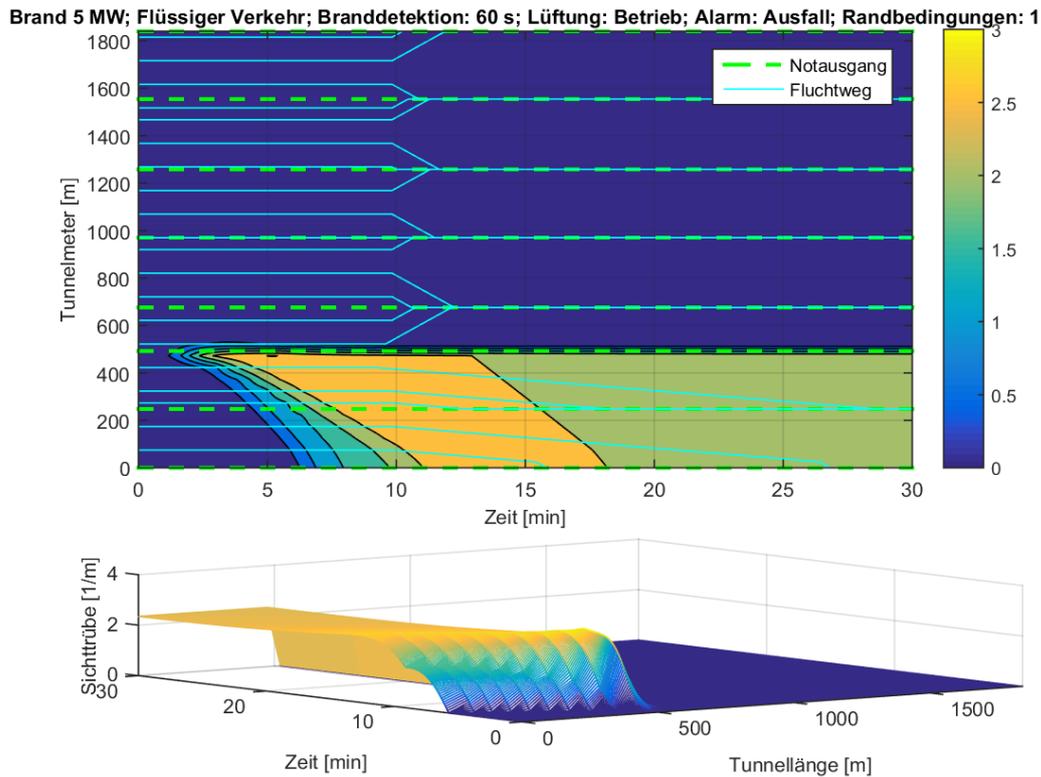


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der Sichttrübe [1/m] (gelb: höchster Wert, blau: niedrigster Wert, dazwischen Abstufung mittels Farbverlauf) in Kombination mit der Fluchwegsimulation

- Todesopfer: Für die Berechnung der statistisch zu erwartenden Todesopfer wird die aufgenommene Dosis der Hitzestrahlung und der Rauchgaskonzentration entlang des ermittelten Fluchweges berechnet. Der Zusammenhang zwischen Dosis und Todesopfer werden über sogenannte Probitfunktionen. Für die Hitzestrahlung wird sowohl die Hitzewirkung des Brandherds selbst, als auch der heißen Rauchgasschicht berücksichtigt.

Im RA-Modell NabraRisk werden somit die Sicherheitsmassnahmen (z. B. Lüftungsmassnahmen, Ereignisdetektion, Intervention, usw.) und verkehrsspezifische Parameter (z. B. Stauhäufigkeiten, u. a.) explizit berücksichtigt.

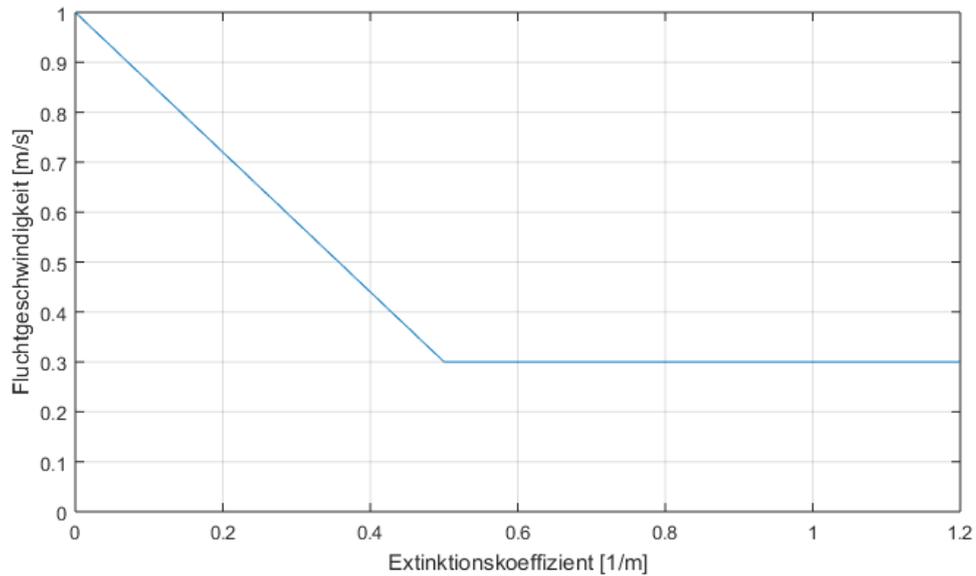


Abbildung 4: Fluchtgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Extinktionskoeffizienten.

1.1.3 Risikoberechnung und - Darstellung

Wahrscheinlichkeits-Ausmaß Diagramm

Als Maß für das Gefährdungspotential dient das Risiko, welches sich aus der Verknüpfung der Wahrscheinlichkeit des Unterszenarios mit dem jeweiligen Schadensausmass ergibt. Die Darstellung des Gefährdungspotentials erfolgt über eine Summenkurve im Wahrscheinlichkeits-Ausmass Diagramm (vgl. Abbildung 5).

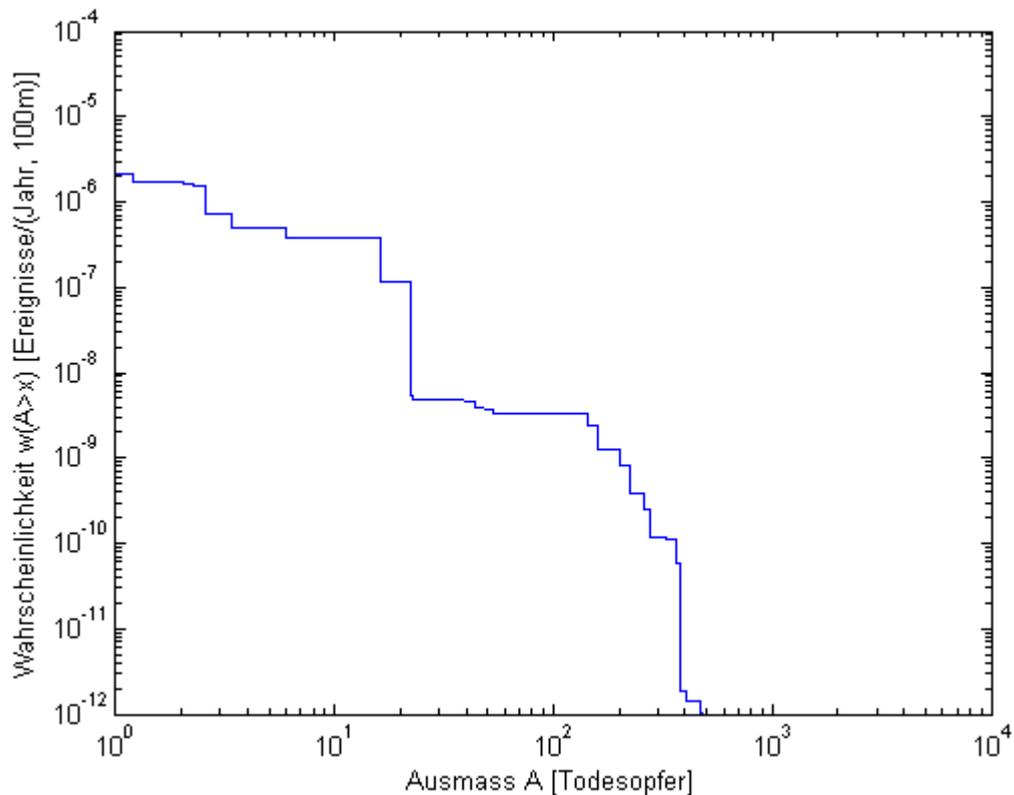


Abbildung 5: Exemplarische Darstellung einer Summenkurve im Wahrscheinlichkeits-Ausmass Diagramm für einen Modelltunnel.

Risikowerte

Insbesondere für die Kostenwirksamkeitsüberlegungen werden die sogenannten Risikowerte beigezogen. Hierbei werden die, für die einzelnen Unterszenarien im Ereignisbaum ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten mit dem zugehörigen Schadensausmass (Risiko = Schadensausmaß x Eintrittswahrscheinlichkeit) multipliziert und über alle Unterszenarien aufaddiert. Die Risikowerte werden für jedes Szenario einzeln und für alle Szenarien gemeinsam ermittelt.

1.1.4 Risikobewertung

Bewertung

Die verschiedenen Varianten werden anhand der zu erwartenden Wirksamkeit und anhand der Kostenwirksamkeit beurteilt.

Kostenwirksamkeit

Die Beurteilung der einzelnen Maßnahmen bezüglich ihrer Kostenwirksamkeit erfolgt über die Berechnung eines Kostenwirksamkeitsverhältnisses. Das Kostenwirksamkeitsverhältnis einer Sanierungsmassnahme ist über die ihr zugeordneten Rettungskosten RK_M zu beurteilen:

$$RK_M = SK_M / \Delta R_M$$

mit:

- RK_M : Rettungskosten [€ / gerettetes Menschenleben]
- SK_M : Sicherheitskosten der Massnahme in [€/Jahr]
- ΔR_M : Risikoreduktion [gerettete Menschenleben / Jahr]

Die Sicherheitskosten SK_M errechnen sich zu:

$$SK_M = DF \times SIK_M + BK_M$$

mit:

- DF: Diskontierungsfaktor [1/Jahr]
- SIK_M : Investitionskosten [€]
- BK_M : Betriebs-/Instandhaltungskosten [€ / Jahr]

Der Diskontierungsfaktor DF errechnet sich aus der vorgesehenen Restnutzungsdauer n und dem Diskontzinssatz i:

$$DF = (d \times (1 + d)^n) / ((1 + d)^n - 1)$$

mit:

- d: Diskontrate / Annuitätenfaktor [-]
- n: Lebensdauer [Anzahl Jahre]

Die Risikoreduktion ΔR_M errechnet sich aus der Differenz des kollektiven Personenrisikos zwischen Ausgangszustand und gedachter Umsetzung von Sicherheitsmassnahmen. Sie kann direkt aus der Differenz der entsprechenden Risikowerte [Todesopfer / (Jahr, km)] multipliziert mit der Tunnellänge errechnet werden.

Das Kostenwirksamkeitsverhältnis ergibt sich abschliessend aus dem Verhältnis zwischen Rettungskosten und den Grenzkosten eines geretteten Menschenlebens. Dabei werden die Grenzkosten eines geretteten Menschenlebens mit 10 Mio. € bei den Brandszenarien bzw. 5 Mio. € bei den Kollisionsszenarien angenommen.

Da die Abschätzung der Kosten und der Risikoreduktion eine gewisse Unschärfe aufweist, schlägt das Heft B66 [4] folgende Kriterien für die Beurteilung auf Basis des Kostenwirksamkeitsverhältnisses vor:

- Kostenwirksamkeitsverhältnis < 1
Massnahmen sind aus Sicht der Kostenwirksamkeit zu realisieren
- $1 \leq$ Kostenwirksamkeitsverhältnis < 2
Realisierung der Massnahmen aus Sicht der Kostenwirksamkeit fallweise prüfen
- $2 \leq$ Kostenwirksamkeitsverhältnis
Realisierung der Massnahmen aus Sicht der Kostenwirksamkeit nicht kostenwirksam

2 Wahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum

2.1 Kollision

Häufigkeit des Initialereignisses Kollision

Vgl. Hauptbericht

Ereignisort

Die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Ereignisorte werden proportional zur entsprechenden Abschnittslänge im Verhältnis zur Tunnellänge gesetzt.

Zeitperiode

Vgl. Hauptbericht

Unfalltyp

Die Wahrscheinlichkeiten des Unfalltyps sind direkt dem Forschungsbericht entnommen.

Verteilung Schadensausmass

Die Wahrscheinlichkeiten für die Verteilung des Schadensausmasses sind direkt dem Forschungsbericht entnommen.

2.2 Brand (ohne Gefahrgüter gemäss ADR)

Initialereignis

Vgl. Hauptbericht

Ereignisort

Die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Ereignisorte werden proportional zur entsprechenden Abschnittslänge im Verhältnis zur Tunnellänge gesetzt.

Zeitraum

Vgl. Hauptbericht

Verkehrszustand

Vgl. Hauptbericht

Detektionszeit

Vgl. Hauptbericht

Technischer Defekt Lüftung

Die Wahrscheinlichkeit für einen technischen Defekt der Lüftung wird zu 1 % angenommen (vgl.[9]).

Technischer Defekt Alarm

Die Wahrscheinlichkeit für einen technischen Defekt der Alarmierung wird zu 1 % angenommen (vgl. [8]).

Aufgeprägte Randbedingungen vor Brandbeginn

Vgl. Hauptbericht

Erfolgreiche Fremdrettung

Vgl. Hauptbericht

3 Schadensausmass

3.1 Kollision

Analog zu den Wahrscheinlichkeiten ist das Schadensausmaß in Abhängigkeit des Unfalltyps und der Verteilung dem Forschungsbericht [4] entnommen.

3.2 Brand

Fremdrettung

Eine erfolgreiche Fremdrettung vermag das Schadensausmaß zu reduzieren. Es liegen jedoch dazu keine statistischen Werte oder Modelle vor. Deshalb wird angenommen, dass mittels einer erfolgreichen Fremdrettung das Schadensausmaß um den Faktor 0.8 bei flüssigem Verkehr bzw. 0.2 im Staufall reduziert werden kann (Annahme).

Notbeleuchtung

Es ist unumstritten, dass die Notbeleuchtung einen positiven Effekt auf die Selbstrettung hat. Es gibt bisher jedoch noch kein Modell, das es erlaubt diesen Effekt zu quantifizieren. Daher wird der Einfluss basierend auf Experteneinschätzungen festgelegt. Es wird geschätzt, dass durch das Fehlen einer Notbeleuchtung die Wahrscheinlichkeit einer nicht erfolgreichen Flucht um den Faktor 1.1 zunimmt (vgl. [10]).

Brandmodellierung

Die Modellierung des Brands erfolgt unter Berücksichtigung folgenden Anmerkungen:

- Brandverlauf: Es wird ein linearer Anstieg des Brandverlaufs angenommen (vgl. Abbildung 6).

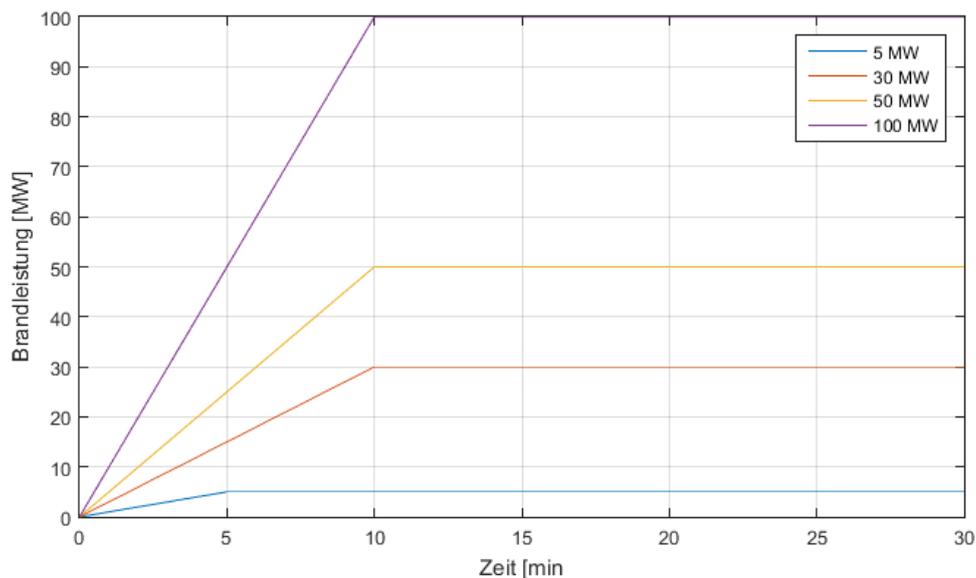


Abbildung 6: Brandverlauf (in Anlehnung gemäss [20])

- Strahlungsanteil: Es wird ein Strahlungsanteil von 25% angenommen.

- Wärmeübergangskoeffizient: Die Tunnelwand wird mit konstanter Temperatur modelliert. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten erfolgt gemäss dem Forschungsbericht [21].
- CO- und Sichtsichttrübe-Bildung: Die momentane Abbrandrate ergibt sich aus der momentanen Brandleistung durch Zugrundelegung eines repräsentativen Verbrennungsprozesses mit einem mittleren Heizwert. Im vorliegenden Fall wird ein mittlerer Heizwert von $H = 18.5 \times 10^6 \text{ J / kg}_{\text{Brennstoff}}$ angesetzt. Die momentane Abbrandrate ergibt sich somit aus:

$$\dot{M}_{\text{Brennstoff}}(t) = \frac{\dot{Q}(t)}{H}$$

Die momentane Bildungsrate $\dot{M}_p(t) [\text{kg/s}]$ von CO und Ruß bei der Verbrennung wird durch einen linearen Zusammenhang aus der momentanen Abbrandrate $\dot{M}_{\text{Brennstoff}}(t) [\text{kg/s}]$, d.h. aus der pro Zeiteinheit verbrauchten Brennstoffmenge berechnet, gemäss:

$$\dot{M}_p = y_p \dot{M}_{\text{Brennstoff}}$$

mit einer mittleren Bildungsverhältniszahl $y_p [\text{kg}_p / \text{kg}_{\text{Brennstoff}}]$ (sogenanntes "Yield") für die Spezies p , wobei p in diesem Fall entweder CO oder Ruß ist.

Für CO ist im OECD/PIARC Risikoanalysemodell eine repräsentative Bildungsverhältniszahl gegeben, mit $y_{\text{CO}} = 0.25 \text{ kg}_{\text{CO}} / \text{kg}_{\text{Brennstoff}}$. Für die Sichtsichttrübe wird ein Wert von $y_{\text{CO}} = 760 / \text{kg}_{\text{Brennstoff}}$ angenommen.

Simulationen

Zur Berücksichtigung der verschiedenen Szenarien, Verzweigungen im Ereignisbaum und den möglichen Strömungszuständen sind insgesamt 219'520 Rechenfälle zur Strömungssimulation und 439'040 Rechenfälle zur Fluchtwegsimulation durchgeführt worden:

- Strömungssimulationen: Je Variante und je Tunnelröhre werden folgende Kombinationen berechnet:
 - 4 Brandlasten
 - 2 Zeitperioden
 - Ereignisorte (H2: 36 Orte, H4: 33 Orte, H5: 29 Orte)
 - 2 Verkehrszustände (Fließender Verkehr / Stau)
 - 2 Zustände Lüftung (Lüftung in Betrieb / Ausfall der Lüftung)
 - 10 Randbedingungen
- Fluchtwegsimulationen: Je Variante und je Tunnelröhre wurden folgende Kombinationen berechnet:
 - 4 Brandlasten
 - 2 Zeitperioden
 - Ereignisorte (H2: 36 Orte, H4: 33 Orte, H5: 29 Orte)
 - 2 Verkehrszustände (Fließender Verkehr / Stau)
 - 2 Zustände Lüftung (Lüftung in Betrieb / Ausfall der Lüftung)
 - 2 Zustände Alarmierung (Alarmierung in Betrieb / Ausfall der Alarmierung)
 - 10 Randbedingungen