



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Strassen ASTRA**

**DOKUMENTATION**  
**RISIKOANALYSE FÜR**  
**TUNNEL DER**  
**NATIONALSTRASSEN**

*Anwendungsbeispiel*

---

*Ausgabe 2014 V1.20*  
*ASTRA 89007*

# Impressum

## **Autor(en)/Arbeitsgruppe**

Gammeter Christian	ASTRA, N-SSI
Gogniat Bernard	ASTRA, N-SSI
Jeanneret Alain	ASTRA, N-SSI
Siegenthaler Reto	ASTRA, I-B (OpSi)
Folly Matthias	ASTRA, I-FU
Schubert Matthias	Matrisk GmbH
Høj Niels Peter	HOJ Consulting GmbH
Brandt Rune	HBI Haerter AG
Köhler Jochen	Matrisk GmbH
Faber Michael H.	Matrisk GmbH

**Übersetzung** (Originalversion in Deutsch)

## **Herausgeber**

Bundesamt für Strassen ASTRA  
Abteilung Strassennetze  
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI  
3003 Bern

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) herunter geladen werden.

© ASTRA 2014

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

## Vorwort

Die vorliegende Dokumentation ASTRA 89007 „Risikokonzept für Tunnel der Nationalstrassen – Anwendungsbeispiel“ ergänzt die Dokumentation ASTRA 89005.

Die vorliegende Dokumentation zeigt ein Anwendungsbeispiel an einem nicht real existierenden Tunnel. Die Struktur der Dokumentation entspricht den Anforderungen an einem Risikobericht gemäss Richtlinie ASTRA 19004. Die Dokumentation soll dem Anwender ein schnelles Verständnis der Methode, der Umsetzung und der Anwendung geben und beispielhaft den Umfang einer Risikoanalyse darstellen.

Die Dokumentation wurde von der im Impressum genannten Arbeitsgruppe unter Leitung des ASTRA konzipiert und geschrieben. Für die aktive Mitarbeit sei allen Beteiligten herzlich gedankt.

### **Bundesamt für Strassen**

Rudolf Dieterle, Dr. sc. techn.  
Direktor



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum</b> .....	<b>2</b>
	<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
1.1	Ziel der Dokumentation .....	7
1.2	Ausgangslage.....	7
1.3	Adressaten .....	7
<b>2</b>	<b>A Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
2.1	A.1 Vorwort.....	8
2.1.1	A.1.1 Projektphase .....	8
2.1.2	A.1.2 Fragestellung und Kontext.....	8
2.2	A.2 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	9
2.3	A.3 Handlungsempfehlungen .....	10
<b>3</b>	<b>B Auftrag und Pflichtenheft</b> .....	<b>11</b>
3.1	B.1 Hintergrund, Ziele und Pflichtenheft .....	11
3.2	B.2 Auftrag .....	11
3.3	B.3 Zeitrahmen.....	11
<b>4</b>	<b>C Grundlagen und Randbedingungen</b> .....	<b>12</b>
4.1	C.1. Randbedingungen .....	12
<b>5</b>	<b>D Systemdefinition und Systemabgrenzung</b> .....	<b>13</b>
5.1	D.1 Verkehrscharakteristiken .....	14
5.1.1	D.1.1 Durchschnittlicher Täglicher Verkehr .....	14
5.1.2	D.1.2 Anteil Schwerverkehr.....	14
5.1.3	D.1.3 Anteil Gefahrgut.....	14
5.1.4	D.1.4 Variationskurven des Verkehrs .....	15
5.1.5	D.1.5 Stautunden .....	16
5.2	D.2 Bauwerkscharakteristiken.....	17
5.2.1	D.2.1 Pläne.....	18
5.3	D.3 Nebenanlagen .....	20
5.3.1	D.3.1 Lüftungssystem .....	20
5.3.2	D.3.2 Einrichtungen zur Sperrung des Tunnels .....	21
5.3.3	D.3.3 Ereignisdetektion .....	21
5.3.4	D.3.4 Signalisation .....	22
5.3.5	D.3.5 Beleuchtung.....	23
<b>6</b>	<b>E Sicherheitsrelevante Anforderungen</b> .....	<b>25</b>
6.1	E.1 Besondere Charakteristik .....	25
6.2	E.2. Abweichungen von Normen und Standards .....	26
6.3	E.3. Schlussfolgerungen aus Kapitel 6 .....	26
<b>7</b>	<b>F. Systemrepräsentation</b> .....	<b>27</b>
7.1	F.1. Detaillierungsgrad .....	27
7.2	F.2. Tunnelkomponenten .....	27
7.3	F.3. Homogene Segmente .....	28
7.3.1	F.3.2 Homogene Segmente in Tunnelkomponente 1 .....	28
7.3.2	F.3.1 Homogene Segmente in Tunnelkomponente 2 .....	30

<b>8</b>	<b>G. Risikoermittlung für den Ist-Zustand .....</b>	<b>32</b>
8.1	G.1. Allgemeine Verkehrsrisiken.....	32
8.2	G.2. Gefahrgutrisiken .....	37
8.3	G.3 Bewertung des Ist-Zustandes.....	38
<b>9</b>	<b>H. Risikoreduzierende Massnahmen .....</b>	<b>39</b>
9.1	H.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m.....	39
9.2	H.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen.....	41
9.3	H.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung .....	42
9.4	H.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h .....	44
<b>10</b>	<b>I. Risikoermittlung nach Massnahmen .....</b>	<b>46</b>
10.1	H.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m.....	46
10.2	H.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen.....	48
10.3	H.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung .....	50
10.4	H.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h .....	52
<b>11</b>	<b>J. Risikobewertung .....</b>	<b>55</b>
11.1	J.1 Massnahmennutzenrechnung $M_{NU}$ der Einzelmassnahmen.....	55
11.1.1	J.1.1 Verringerung der Abstände der Notausgänge auf 300 m .....	55
11.1.2	J.1.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinne.....	55
11.1.3	J.1.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung .....	56
11.1.4	J.1.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h.....	56
11.2	J.3 Massnahmenkostenrechnung $M_{KO}$ .....	57
11.2.1	J.3.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m .....	57
11.2.2	J.3.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen.....	57
11.2.3	J.3.4 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung .....	58
11.2.4	J.3.5 Reduktion der Geschwindigkeit von 100km/h auf 80km/h .....	58
11.3	J.4. Massnahmeneffizienz $M_{EFF}$ .....	59
11.4	J.5. Bewertung von den Massnahmenkombinationen, Akzeptanz .....	60
<b>12</b>	<b>K. Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>63</b>
12.1	K.1. Tabellarische Zusammenfassung.....	63
12.2	K.2. Graphische Darstellung .....	64
12.3	K.3 Variantenwahl .....	68
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
	<b>Auflistung der Änderungen.....</b>	<b>71</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel der Dokumentation

Diese Dokumentation soll Anwendern der Methode den Umfang und den Detaillierungsgrad der Risikoanalyse gemäss [3] und [14] vorstellen und als Anwendungsbeispiel dienen. Das Anwendungsbeispiel ist allgemein gehalten und deckt nicht alle möglichen Fälle ab, die in der Praxis auftreten können. Es ist in diesem Sinne als allgemeines vereinfachtes Beispiel zu verstehen.

## 1.2 Ausgangslage

In [3] und [14] werden die Anforderungen an die Durchführung einer Risikoanalyse für Strassentunnel der Nationalstrassen festgelegt. In diesem Dokument wird ein Anwendungsbeispiel gezeigt. Bei dem Anwendungsbeispiel handelt es sich um einen nicht real existierenden Tunnel. Die hier angegebenen Werte zu Kosten von Massnahmen sind ebenfalls nicht real.

Für reale Projekte sind die Kosten projektspezifisch zu ermitteln und dürfen nicht aus dieser Dokumentation entnommen werden und es darf nicht auf diese Dokumentation referenziert werden. Ebenso können die Schlussfolgerungen in Bezug auf die Risiken und die Massnahmeneffizienz der hier untersuchten und dargestellten Massnahmen, nicht auf reale Projekte übertragen werden. Das untersuchte Massnahmenportfolio ist beispielhaft und nicht vollständig.

Die Struktur des Berichtes richtet sich strikt nach den Anforderungen an den Risikobericht gemäss [3]. Am Anfang jedes Kapitels ist in einem grauen Kasten der generelle Inhalt des Kapitels zusammengefasst. Nicht in jedem Projekt sind zwingend alle Aspekte enthalten. Auch in diesem Dokument sind nicht alle Aspekte enthalten und einiges nur kurz beschrieben.

Die Pläne sind im Anwendungsbeispiel stark vereinfacht dargestellt, um den fiktiven Charakter des Beispiels zu unterstreichen.

## 1.3 Adressaten

Diese Dokumentation richtet sich vor allem an Anwender, die mit dem Vollzug des Risikokonzepts beauftragt werden (z.B. Ingenieure, Experten).

## 2 A Zusammenfassung

### 2.1 A.1 Vorwort

Inhalt
- Projektphase für die in Auftrag gegebene Risikoanalyse
- Auftraggeber, Personen & Kontaktinformationen
- Fragestellung/Problemstellung und Kontext

Es handelt sich bei dem betrachteten Tunnel um einen fiktiven Tunnel auf dem Nationalstrassennetz. Die Projektphase ist frei gewählt. Es handelt sich um ein Erhaltungsprojekt in der Projektphase MK.

Auftraggeber ist das ASTRA, Abteilung N, Bereich SSI.

Es soll geprüft werden, ob das Risiko in dem Tunnel im Ist-Zustand tolerierbar ist und ob es ggfs. effiziente Massnahmen gibt, die die Sicherheit erhöhen können.

#### 2.1.1 A.1.1 Projektphase

Erhaltungsprojekt

EK

MK

MP

Neubauprojekt/Ausbauprojekt

GP

AP

DP

#### 2.1.2 A.1.2 Fragestellung und Kontext

Das vorliegende Anwendungsbeispiel ist ein fiktives Beispiel und soll als Supplement zur Richtlinie 19004 [3] und zur Dokumentation 85005 [14] dienen.

Der Vollzug des Risikokonzeptes soll vorgestellt werden. Das Dokument soll als Wegleitung für Risikoanalysen dienen.

Dabei können einige Aspekte im Rahmen des Anwendungsbeispiels nur ansatzweise angegangen werden. In der Massnahmenermittlung werden Massnahmen vorgegeben, die untersucht werden. Es werden nicht alle möglichen Massnahmen diskutiert. Eine Massnahmenkombination der effizientesten Massnahmen wird untersucht.

## 2.2 A.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

### Inhalt

- Kurze Beschreibung des Tunnels und seiner Funktion
- Kurze Beschreibung des Verkehrs und der Bedingungen
- Kurze Beschreibung der Massnahmen, die betrachtet wurden
- Kurze Zusammenfassung der Ergebnisse

Es handelt sich bei dem betrachteten Tunnel um einen fiktiven Tunnel auf dem Nationalstrassennetz. Es betrifft ein Erhaltungsprojekt in der Projektphase MK.

Der Beispieeltunnel der Nationalstrasse wurde Mitte der 80er Jahre in Betrieb genommen und seither nicht saniert. Es handelt sich um ein zweiröhriges Tunnel-Bauwerk mit richtungsgetrennter Verkehrsführung mit je zwei Fahrspuren und einer Länge von 4.8 km.

Der durchschnittliche tägliche Verkehr DTV beträgt im Bezugsjahr 2014 55'000 Fahrzeuge pro Tag. Unter Verwendung des Prädiktionsmodell für Autobahnen erhöht sich die Verkehrsstärke von 2014 bis 2029 auf 70'000 Fzg/24h, welches einer hohen Verkehrsdichte entspricht. Prognostiziert auf das Jahr 2029, so ist mit 110 Staustunden in Richtung Portal 1 und 210 Staustunden in Richtung Portal 2 zu rechnen.

Der Tunnel verfügt über eine klassische Querlüftung gemäss Lüftungsrichtlinien 1983, welches der heutigen Norm nicht entspricht. Der Tunnel hat eine Längsneigung von 1% bis 3.5%. Es fehlt ein normkonformes Entwässerungssystem. Des Weiteren sind die Abstände zwischen Notausgänge mit 600 m über dem Normwert von 300 m, und die Signalisation ist nicht der Norm entsprechend.

Aufgrund der besonderen Charakteristiken und den Abweichungen von Normen und Standards ist eine Risikoanalyse gemäss ASTRA 19004 und ASTRA 89005 durchgeführt worden. Als Teil der Risikoanalyse ist der Ist-Zustand untersucht worden. Das Risiko im Mustertunnel ist im Ist-Zustand (15 Jahre nach Bezugsjahr 2014) im ALARP-Bereich. Daher sind Massnahmen und Massnahmenkombinationen untersucht worden.

Die folgenden Massnahmen wurden untersucht und bewertet (die Identifikation von allen möglichen Massnahmen sind in diesem fiktiven Beispiel nicht erfolgt):

- Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m;
- Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen;
- Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung;
- Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h.

## 2.3 A.3 Handlungsempfehlungen

Inhalt
- Handlungsempfehlung und Begründung

Die Risikoanalyse gemäss ASTRA 19004 und ASTRA 89005 hat zu den folgenden Handlungsempfehlungen geführt:

### Weitere Analysen:

Die Ergebnisse der Analyse der Gefahrgutunfälle zeigen, dass das Gefahrgutrisiko im Ist-Zustand die Akzeptanzgrenzen der Störfallverordnung nicht überschreitet. Es wird aufgrund dieser Ergebnisse nicht empfohlen, den Tunnel zusätzlich nach ADR (ASTRA 19002) [7] zu untersuchen.

### Massnahmen in Bezug auf ein Abweichungsverbot:

Gemäss der UVEK-Weisungen ASTRA 74001 besteht ein Abweichungsverbot in Bezug auf SOS-Nischen, Ausstellbuchten, Notausgänge und Signalisation der Sicherheitsausrüstungen. Deswegen ist unabhängig von den quantitativen Ergebnissen der Risikoanalyse die Normenkonformität in Bezug auf die Signalisation herzustellen.

### Kosteneffiziente Massnahmenkombination:

Aufgrund von Beurteilung der Kosteneffizienz wird die folgende Massnahme empfohlen:

Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m.

Die Massnahme bedeutet, dass 8 neue Notausgänge gebaut werden müssen – (inkl. der dazu gehörigen Elemente: Signalisierung, Beleuchtung, etc.). Die Kostenschätzung auf Stufe MK beträgt 5 Mio. CHF.

Keine weiteren Massnahmenkombinationen sind kosteneffizient, und weitere Massnahmen müssen nach der Methodik ASTRA 19004 und ASTRA 89005 (und dem ALARP-Prinzip) nicht umgesetzt werden.

### Risikogrenzwert:

Mit der empfohlenen Massnahmenkombination ist das Todesfallrisiko mit 7.08 Tote pro Milliarde Fahrzeugkilometer unter dem oberen Grenzwert von 13.2 Tote pro Milliarde Fahrzeugkilometer. Mit der empfohlenen Massnahmenkombination sind die Grenzwerte der Störfallverordnung nach dem hier verfolgten Ansatz auch eingehalten.

## 3 B Auftrag und Pflichtenheft

### 3.1 B.1 Hintergrund, Ziele und Pflichtenheft

Inhalt
- Objekt und Umgebung
- Hintergrund der Analyse, evt. Anforderungen aus Ausschreibung (z.B. Massnahmen)
- Prozedurales Vorgehen der Risikoanalyse kurz beschreiben

Der zu betrachtende Mustertunnel (modellhaftes Beispiel) der Nationalstrasse wurde Mitte der 1980er Jahre in Betrieb genommen und seither nicht saniert. Es handelt sich um ein zweiröhriges Tunnelbauwerk mit richtungsgetrennter Verkehrsführung und einer Länge von 4.8 km.

Der Tunnel liegt im Bereich einer städtischen Agglomeration. In einer Distanz von 1.2 km zum Tunnelportal 1 liegt eine Autobahnauf- und Autobahnabfahrt für beide Fahrtrichtungen. Die Distanz der Autobahnauf- und Autobahnabfahrt für beide Fahrtrichtungen beim Tunnelportal 2 beträgt 3.5 km.

Der Tunnel entspricht in einigen Punkten nicht den aktuell gültigen Normen und Standards, welche bei einem Neubau eines Tunnels der Nationalstrasse angewandt werden.

### 3.2 B.2 Auftrag

Es ist zu prüfen, ob das Risikokzept für Strassentunnel der Nationalstrassen gemäss [3] und [14] zu vollziehen ist. Dabei ist der detaillierte Ansatz zu wählen. Zeigt es sich, dass das Risiko im Ist-Zustand nicht tolerierbar ist, so werden beispielhaft die folgenden risikoreduzierenden Massnahmen untersucht:

- Risikoermittlung mit Massnahme M1: Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m;
- Risikoermittlung mit Massnahme M2: Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen;
- Risikoermittlung mit Massnahme M3: Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung;
- Risikoermittlung mit Massnahme M4: Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h.

Es sind die Einzelmassnahmen zu bewerten und das optimale Massnahmenpaket ist zu identifizieren und zu bewerten.

### 3.3 B.3 Zeitrahmen

Inhalt
- Zeitrahmen des Projekts

Das gesamte Projekt wurde 02.2012 gestartet und ist voraussichtlich 12.2014 abgeschlossen.

## 4 C Grundlagen und Randbedingungen

<b>Inhalt</b>
- Tabellarische Zusammenstellung der Grundlagen und Pläne
- Angabe, ob es vorher bereits Risikoanalysen für diesen Tunnel gab und ggf. Zusammenfassung der Ergebnisse
- Versionen der verwendeten ASTRA Richtlinien und ASTRA Dokumentationen angeben (Insb ASTRA 19004 und ASTRA 89005)
- Zusammenstellung der bestehenden Randbedingungen

### **Wichtige Vorbemerkung die Grenzkosten betreffend:**

Im folgenden Beispiel wurde für die Grenzkosten der Wert von 5'000'000.- CHF angewendet.

Für die Umsetzung der Methodik in den Projekten muss der vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE empfohlene Wert angewendet werden (*Value of statistical life (VOSL): empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz*).

Es gelten die Beurteilungskriterien der Dokumentation ASTRA 89005 [14] sowie die Richtlinie ASTRA 19004 [3].

Abb. 4.1 Zusammenfassung der Beurteilungskriterien.

Studie	Wert	Einheit
Grenzkosten	Beispiel : 5'000'000 Projekte: VOSL ARE	CHF
Teuerung	1	%
Zinssatz	2	%
Oberer Grenzwert ALARP (GII)	13.2	Tote/Mrd. Fzg. km
Unterer Grenzwert ALARP (GI)	0.132	Tote/Mrd. Fzg. km

Für den Tunnel ist bisher noch keine Risikoanalyse durchgeführt worden. Auch eine Risikoanalyse für Gefahrgüter gemäss Richtlinie ASTRA 19002 [7] ist für diesen Tunnel bisher nicht durchgeführt worden.

Abb. 4.2 Bestehende Risikoanalysen.

Studie	Vorhanden	Jahr	Referenz
ADR CH Studie (Gefahrgut)	NEIN	-	[7] und [15]
Risikoanalysen gemäss ASTRA 19004	NEIN	-	-
Andere Risikoanalysen	NEIN	-	-

Abb. 4.3 Verwendete Grundlagen.

Grundlage	Version / Jahr	Referenz
ASTRA 74001	V1.01 / 2010	[2]
ASTRA 19004	V1.01 / 2014	[3]
ASTRA 89005	V1.01 / 2014	[14]
ASTRA 13001	V2.02 / 2008	[4]
SIA 197/2	SIA 197/2:2004	[12]

### 4.1 C.1. Randbedingungen

Randbedingungen, die nicht aus den ASTRA Standards resultieren, sind nicht bekannt.

## 5 D Systemdefinition und Systemabgrenzung

### Inhalt

- Qualitative Beschreibung des Tunnels
- Qualitative Beschreibung der Umgebung
- Beschreibung und Nennung von aussergewöhnlichen Charakteristiken, auch wenn diese nicht in der Analyse berücksichtigt werden (z.B. Lagerung brennbarer Materialien, Anfahrtszeit der Notdienste, Lichtsignalanlagen, aussergewöhnlicher Busverkehr)

Der Beispieeltunnel der Nationalstrasse wurde Mitte der 80er Jahre in Betrieb genommen und seither nicht saniert. Es handelt sich um ein zweiröhriges Tunnel-Bauwerk mit richtungsgetrennter Verkehrsführung und einer Länge von 4.8 km. Der Tunnel liegt im Bereich einer städtischen Agglomeration.

Der Tunnel wird gemäss der Methodik mit je 8 homogenen Segmenten beschrieben. Die Tunnelcharakteristiken sind über die Länge weitestgehend konstant. Lediglich die Längsneigung ändert sich. Sie beträgt von km 0 bis km 2.9: 1% und von km 2.9 bis km 4.8: 3.5%.

7 Segmente ergeben sich aus den Portalzonen und der mittleren Zone, das 8te Segment ergibt sich durch die unterschiedliche Längsneigung.

Die Entscheidungen in Bezug auf risikoreduzierende Massnahmen werden auf das Jahr 2014 bezogen.

Für die Massnahmenbeurteilung der risikoreduzierenden Massnahmen werden die Kosten für die einzelnen Massnahmen berücksichtigt, sowie die Grenzkosten für die Todesfälle. Dies entspricht einer Monetarisierung der natürlichen Einheiten, um zu entscheiden, wieviel unter Berücksichtigung der Verhältnismässigkeit in die Sicherheit investiert werden sollte.

Nicht berücksichtigt werden Umweltschäden und Konsequenzen, die Dritten entstehen, wie beispielsweise Sachschäden an Fahrzeugen und Zeitkosten für Umfahrungen.

## 5.1 D.1 Verkehrscharakteristiken

Inhalt
- Tabellarische Zusammenfassung der Verkehrscharakteristiken
- In den Unterkapiteln werden die Charakteristiken beurteilt und genau beschrieben.

Abb. 5.4 Übersicht über die Verkehrscharakteristiken.

DTV (2014)	[Fzg/24h]	55'000
DTV (2029 Prognose)	[Fzg/24h]	70'000
Verkehrsstärke Spitzenstunde (2014)	[Fzg/h Spur]	2500
Anteil Schwerverkehr	[% des DTV24 2014]	11
Anteil Schwerverkehr (2029 Prognose)	[% des DTV24 2029]	9
Anteil Gefahrgut	[% des Schwerverkehrs 2014]	6
Anteil Gefahrgut (2029 Prognose)	[% des Schwerverkehrs 2029]	6
Stautunden Rtg. 1	[h/a]	150
Stautunden Rtg. 1 (2029 Prognose)	[h/a 2029]	210
Stautunden Rtg. 2	[h/a]	100
Stautunden Rtg. 2 (2029 Prognose)	[h/a 2029]	110
Zeitvariationskurve des Verkehrs DTV24	[-]	D
Zeitvariationskurve des Verkehrs Rtg. 1	[-]	C
Zeitvariationskurve des Verkehrs Rtg. 2	[-]	E

### 5.1.1 D.1.1 Durchschnittlicher Täglicher Verkehr

Der Durchschnittliche Tägliche Verkehr DTV beträgt im Bezugsjahr 2014 55'000 Fahrzeuge pro Tag, gemessen an der Messstellen Nr. 1'57Q der Schweizerischen automatischen Strassenverkehrszählung.

Unter Verwendung des Prädiktionsmodells für Autobahnen erhöht sich die Verkehrsstärke von 2014 bis 2029 auf 70'000 Fzg/24h.

### 5.1.2 D.1.2 Anteil Schwerverkehr

Der Anteil des Schwerverkehrs beträgt im Jahr 2014 11% und liegt damit 3% über dem Durchschnittswert der Autobahnen in der Schweiz.

Gemäss den Prognosen beträgt der Anteil des Schwerverkehrs im Jahr 2029 einem Anteil von 9 % und nimmt nominell nur geringfügig um rund 300 Fzg/24h zu.

### 5.1.3 D.1.3 Anteil Gefahrgut

Der Anteil Gefahrgut hat im Referenzjahr 2014 einen Anteil von 6% am Schwerverkehr. Es wird prognostiziert, dass der Anteil Gefahrgut konstant bleibt und im Jahr 2029 ebenfalls 6 % beträgt.

### 5.1.4 D.1.4 Variationskurven des Verkehrs

Inhalt
- Variationskurven des Verkehrs darstellen und beschreiben
- Saisonale Schwanken beschreiben und bewerten, ob diese berücksichtigt werden müssen.

In Abb. 5.5 und Abb. 5.6 sind die Zeitvariationskurven des Verkehrs dargestellt. Es wird angenommen, dass sich der Typ der Variationskurven in den nächsten 15 Jahren nicht ändert.

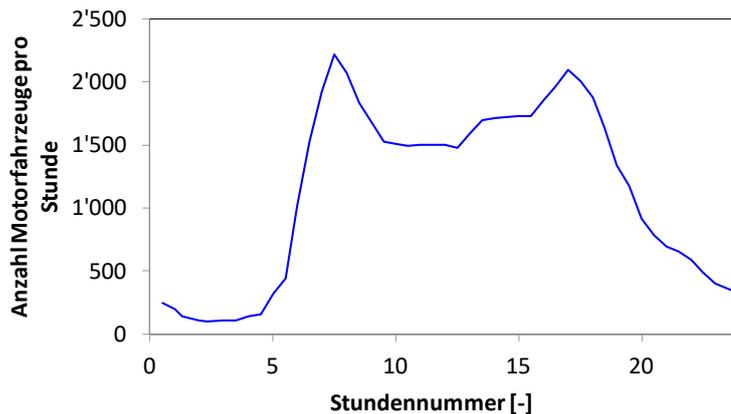


Abb. 5.5 Zeitvariationskurve des DTV für die Richtung 1 im Bezugsjahr 2014.

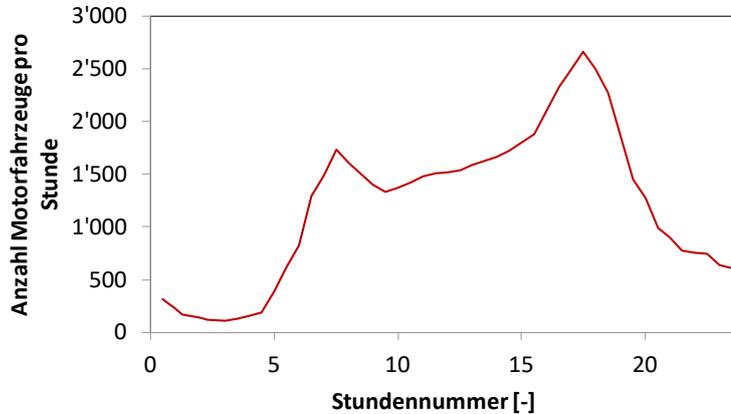


Abb. 5.6 Zeitvariationskurve des DTV für die Richtung 2 im Bezugsjahr 2014.

Aus Abb. 5.5 kann geschlossen werden, dass der folgende Typ Zeitvariationskurve für Richtung Portal 1 gemäss ASTRA 89005 vorliegt:

- Typ A:** ausgeprägte Spitze am Morgen.
- Typ B:** Spitze am Morgen kombiniert mit einer kleinen Spitze am Abend.
- Typ C:** vergleichsweise gleichverteilter Verkehr während des Tages.
- Typ D:** ausgeprägte Spitze am Morgen und am Abend.
- Typ E:** ausgeprägte Spitze am Abend, kleine Spitze am Morgen.
- Typ F:** ausgeprägte Spitze am Abend.

Aus Abb. 5.6 kann geschlussfolgert werden, dass der folgende Typ Zeitvariationskurve für Richtung Portal 2 gemäss ASTRA 89005 vorliegt:

- Typ A:** ausgeprägte Spitze am Morgen.
- Typ B:** Spitze am Morgen kombiniert mit einer kleinen Spitze am Abend.
- Typ C:** vergleichsweise gleichverteilter Verkehr während des Tages.
- Typ D:** ausgeprägte Spitze am Morgen und am Abend.
- Typ E:** ausgeprägte Spitze am Abend, kleine Spitze am Morgen.
- Typ F:** ausgeprägte Spitze am Abend.

### 5.1.5 D.1.5 Staustunden

Bei der derzeitigen Verkehrsstärke können die folgenden Stauanteile angenommen werden:

- Stauanteil in Richtung Portal 1 betragen 100 Stunden pro Jahr, mehrheitlich während 07:30 – 09:00h und 17:30 – 18:30h.
- Stauanteil in Richtung Portal 2 betragen 150 Stunden pro Jahr, mehrheitlich während 07:30 – 09:00h und 17:30 – 18:30h.

Prognostiziert man den Verkehr auf das Jahr 2029, so ist mit den folgenden Stauanteilen zu rechnen:

- Stauanteil in Richtung Portal 1 betragen 110 Stunden pro Jahr, mehrheitlich während 07:30 – 09:00h und 17:30 – 18:30h.
- Stauanteil in Richtung Portal 2 betragen 210 Stunden pro Jahr, mehrheitlich während 07:30 – 09:00h und 17:30 – 18:30h.

## 5.2 D.2 Bauwerkscharakteristiken

Inhalt	
-	Tabellarische Zusammenfassung der Bauwerkscharakteristiken
-	In den Unterkapiteln werden die Charakteristiken beurteilt und genau beschrieben.

Abb. 5.7 Übersicht über die Bauwerkscharakteristiken.

Baujahr	[-]	1985
Länge	[m]	4800
Anzahl Röhren	[-]	2
Verkehrsführung	[-]	Richtungsverkehr
Linienführung	[-]	Gerade ohne Kurven
Längsneigung		Dachprofil km 0 bis km 2.9 = 1% km 2.9 bis km 4.8 = -3.5%
Querneigung	[%]	2
Anzahl Fahrspuren pro Richtung	[-]	2
Breite Fahrbahn	[m]	7.75
Breite Bankett beidseits	[m]	0.75
Querverbindungen	[m]	Alle 600 m
Entwässerung Fahrbahn	[-]	Trennsystem Einzelne siphonierte Einlaufschächte alle 25 m Schluckvermögen der Schächte 15l/s
Lüftungssystem	[-]	Querlüftung gemäss Lüftungsrichtlinie 1983
Signalisierte Geschwindigkeit	[km/h]	100
Beleuchtung	[-]	Durchfahrts- und Adaptionenbeleuchtung

## 5.2.1 D.2.1 Pläne

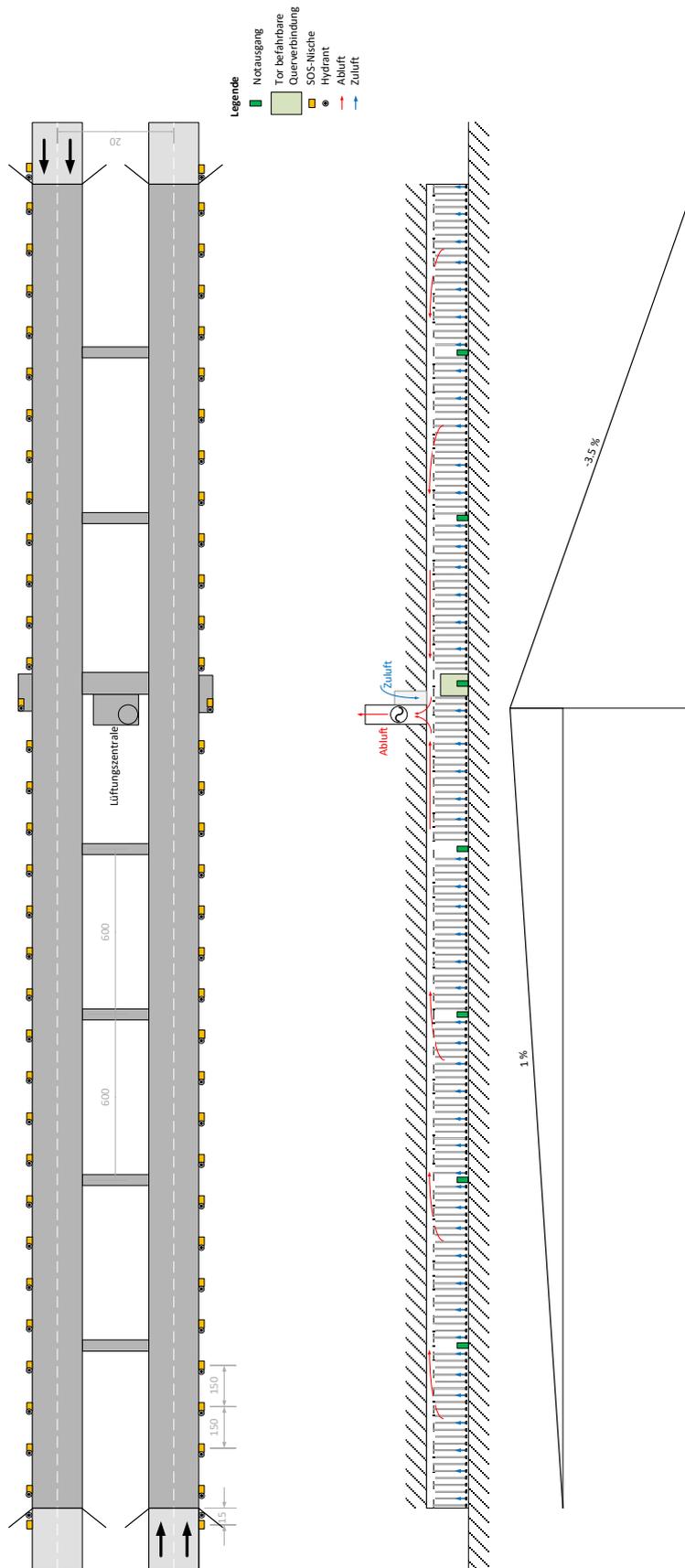


Abb. 5.8 Schematische Situation, Längsschnitt des Mustertunnels.

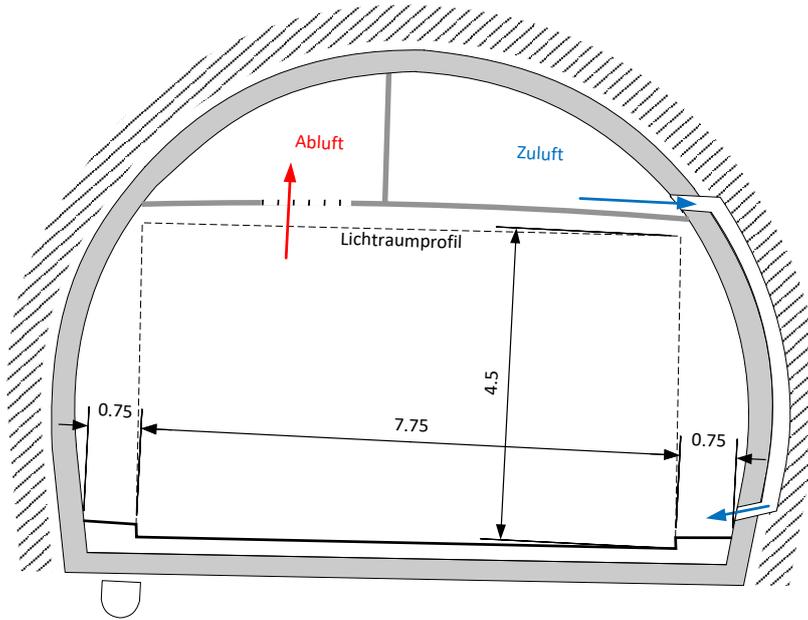


Abb. 5.9 Schematisches Querprofil des Mustertunnels.

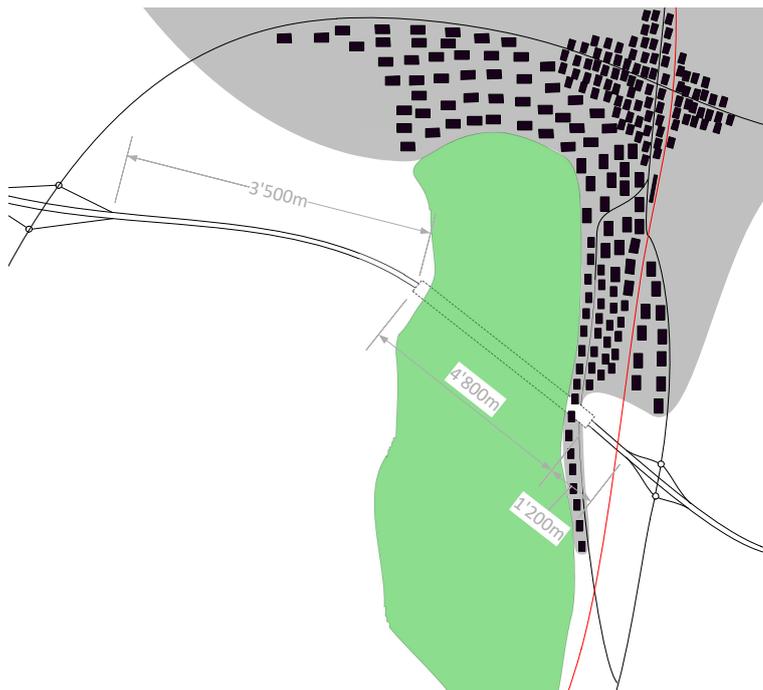


Abb. 5.10 Lage des Tunnels unter einer lokalen Erhebung mit Wald (grün) zum Siedlungsgebiet (grau) mit einzelnen Gebäuden und Bahnlinie (rot), welche die Autobahn unterquert.

## 5.3 D.3 Nebenanlagen

Inhalt
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tabellarische Zusammenfassung der Nebenanlagen</li> <li>- In den Unterkapiteln werden die Charakteristiken beurteilt und genau beschrieben.</li> </ul>

### 5.3.1 D.3.1 Lüftungssystem

Die Kennwerte des Lüftungssystems sind im Folgenden dargestellt:

- Lüftungsquerschnitt Fahrraum: 45 m<sup>2</sup>;
- Potentialdifferenz zwischen den Portalen: keine;
- Lüftungsquerschnitt Zwischendecke:
  - Abluftkanal: 3 m<sup>2</sup>;
  - Zuluftkanal: 6.5 m<sup>2</sup> (Zuluft über Sekundärkanäle alle 10 m).
- Antriebsleistung pro Axialventilatoren: 250 kW;
- Anzahl Axialventilatoren: 4 (2 pro Röhre);
- Absaugmenge Lüftungszentrale: 80 m<sup>3</sup>/s pro km;
- Frischluftbedarf: 890 m<sup>3</sup>/s (gesamter Tunnel, beide Röhren).

Der Tunnel verfügt somit derzeit über eine klassische Querlüftung gemäss Lüftungsrichtlinien 1983 (Grundlagen der Belüftung von Strassentunnel, ASB, Mai 1983):

- ⇒ Absaugmenge: 80 m<sup>3</sup>/s pro km;
- ⇒ Frischluftbedarf: 890 m<sup>3</sup>/s (gesamter Tunnel, beide Röhren, entspricht 93 m<sup>3</sup>/s pro km).

Dazumal betrug die Dimensionierungsbrandlast 20 MW mit einer Rauchmengenproduktion von 60 m<sup>3</sup>/s gegenüber heute 30 MW mit einer Rauchmengenproduktion von 80 m<sup>3</sup>/s. Zudem war es die Philosophie, 133% der Rauchmenge über eine Länge von 1 km abzusaugen, was den angegebenen 80 m<sup>3</sup>/s pro km entspricht. Es wurde typischerweise etwa 30% der verfügbaren Zuluftmenge, was 28 m<sup>3</sup>/s pro km entspricht, im Entrauchungsabschnitt zugeführt.

In der Dokumentation ASTRA 89005 entspricht das Lüftungssystem für den Ist-Zustand daher:

(9) Querlüftung (Zu- und Abluft) ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit.

Angenommen, dass 30% der verfügbaren Zuluftmenge zugeführt wird, ist die Zuluftmenge niedriger als die Abluftmenge. Demzufolge muss gemäss Abb 4.38 in ASTRA 89005 die Umrechnung gemäss 9c durchgeführt werden und das Referenz-Lüftungssystem für den Ist-Zustand ist folgendes:

(4) Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit.

Der Referenzgrad in ASTRA 89005 berechnet sich wie folgt:

$$\frac{(\text{Abluft} - \text{Zuluft}) [\text{m}^3/\text{s}, \text{ km}]}{5 \left[ \frac{1}{\text{km}} \right] * 4 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * \text{Tunnelquerschnitt} [\text{m}^2]}$$

Mit einem Tunnelquerschnitt von 45 m<sup>2</sup> beträgt der Referenzgrad somit:

$$\frac{80-28}{5*4*45} = 0.06$$

Das Lüftungssystem wird wie folgt eingestuft:

- natürliche Lüftung** **94%**
- Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit**
- Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit**
- Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit** **6%**
- Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit**

Die Lüftungsstrategie ist nicht bekannt, so dass mit der a-priori Verteilung für die Lüftungsstrategie gerechnet werden muss (N/A):

- Lüftungsstrategie für flüssigen Verkehr**
- Lüftungsstrategie für Stau**
- Staudetektion**
- N/A**

### 5.3.2 D.3.2 Einrichtungen zur Sperrung des Tunnels

Die Einrichtungen zur Sperrung des Tunnels umfassen Lichtsignalanlagen und Barrieren vor den Tunneleingängen sowie Lichtsignalanlagen im Tunnel.

Tunnelsperrung bei bestimmten Ereignissen kann durch das folgende Verkehrsmanagement gesteuert werden: Wechseltextanzeige, Fahrstreifen-Lichtsignal-System, Variable Gefahren- und Vorschriftssignalisation und Lichtsignalanlagen [8]. Der angestrebte Ausstattungsgrad hängt von der geografischen Platzierung des Tunnels ab. Diese ist im Anwendungsbeispiel nicht bekannt.

Das Anwendungsbeispiel ist mit einer 3-Kammer-Ampel vor den Portalen und im Tunnel in Abständen von 300 m (je eine für beide Fahrstreifen) ausgestattet. Der Tunnel hat keine physische Barriere vor Portalen.

### 5.3.3 D.3.3 Ereignisdetektion

Die Überwachung umfasst Systeme im Tunnel, die Ereignisse registrieren, Alarmer auslösen und sicherheitsrelevanten Anlagen aktivieren.

Die Überwachung ist mit der Verkehrsleitzentrale verbunden. Die Verkehrsleitzentrale wird im Ereignisfall alarmiert und muss die Einsatzzentrale/Blaulichtorganisationen alarmieren. Die Verkehrsleitzentrale trägt die Verantwortung im Ereignisfall, die Kommunikation aufrecht zu erhalten und die technischen Anlagen zu steuern und zu kontrollieren.

Der Tunnel ist mit folgenden Überwachungssystemen ausgestattet:

- Thermische Linearmelder (Meldezeit 180 Sekunden);
- Brandalarm bei Entnahme Feuerlöscher;
- Verkehrsfernsehen ohne Ereignisdetektion. Die Videoüberwachung mit manueller Aufschaltung in der Leitzentrale (ohne automatische Ereigniserkennung).

Damit davon ausgegangen werden kann, dass eine Ereignisdetektion vorhanden ist, muss entweder eine Videoüberwachung mit Branderkennung, Brandmeldekabel oder Rauchmelder oder ein gleichwertiges System vorhanden sein.

Daher wird der Tunnel wie folgt eingestuft:

- ohne Ereignisdetektion  
 mit Ereignisdetektion

### 5.3.4 D.3.4 Signalisation

Die Signalisation im Tunnel dient zur Kommunikation mit den Verkehrsteilnehmern, darunter zur Mitteilung der Verkehrsregeln und zum Hinweis auf den Sicherheitseinrichtungen.

In einem Tunnel können die folgenden Verkehrssignale installiert sein:

- Feste Signale (Vorschriftssignale, Hinweissignale);
- Wechselsignale;
- Lichtsignale (Ampeln, Fahrstreifenlichtsignale);
- Wegweiser;
- Hinweisschilder;
- Wechseltextanzeigen.

In aktuellem Tunnel ist folgende Signalisation vorhanden:

- Feste Signale mit Höchstgeschwindigkeit 100 km/h;
- 3-Kammer-Ampel vor den Portalen und im Tunnel in Abständen von 300 m (je eine für beide Fahrstreifen);
- Keine physische Barriere vor den Portalen;
- Hinweistafeln direkt bei Querverbindungen und direkt bei SOS-Nischen. Schlecht erkennbar und nicht ASTRA 13010 Richtlinie entsprechend. (ASTRA 13010, Zif. 3: Signal SSV 4.81 „Telefon“ mit Zusatz „SOS“ und Signal SSV 4.92 „Feuerlöscher“; Signal SSV 4.95 „Notausgang“ und Signalisation der Notausgangstür).

Die folgende Signalisation (SIA 197/2, Zif. 9.5.3 und ASTRA 13010, Zif. 3) wird angenommen:

- Signalisation der Abstellplätze: Signal SSV 4.16 „Abstellplatz für Pannenfahrzeuge“;
- SOS-Alarmkasten (orange beschichtet, RAL 2004, mit SOS und den Symbolen für Telefon und Feuerlöscher gemäss SSV beschriftet);
- Signalisation des Fluchtweges im Fahrraum: Signal SSV 4.94 „Richtung und Entfernung zum nächsten Notausgang“ (nachleuchtend);
- Signalisation der verfügbaren Radiosender: Signal SSV 4.90 „Radio-Verkehrsinformation“;
- Angabe der Tunnellänge: Signal SSV 4.07 „Tunnel mit Angabe der verbleibenden Distanz bis zur Tunnelausfahrt“;
- Optische Leiteinrichtung mit Lichtpunkten auf beiden Seiten der Fahrbahn am Rande des Banketts. Abstände zwischen den Lichtpunkten sind 12,50 m in den Bereichen der Adaptationsbeleuchtung und 25 m auf der Innenstrecke;
- Signalisation für Ereignisdienste;
- Signalisation für Betrieb und Unterhalt.

Gemäss der UVEK-Weisungen ASTRA 74001 besteht ein Abweichungsverbot in Bezug auf die Signalisation bzw. Beschilderung der SOS-Nischen, Ausstellbuchten, Notausgänge und weitere Sicherheitsausrüstungen. Im vorliegenden Tunnel ist die

- Signalisation normenkonform  
 Signalisation nicht normenkonform

Unabhängig von der Risikoanalyse ist die Normenkonformität im vorliegenden Tunnel in Bezug auf die Signalisation herzustellen.

### 5.3.5 D.3.5 Beleuchtung

Die erforderliche Leuchtdichte nach SN 640551-1 im Tunnel ist für das Anwendungsbeispiel in Abb. 5.11 dargestellt.

Der Tunnel ist mit einer Durchfahrts- und Adaptionsbeleuchtung ausgestattet. Eine Messung der Leuchtdichte im Tunnel zeigt, dass die Vorgaben aus der Norm genau eingehalten sind. Hier besteht keine Abweichung zur Norm (vgl. Abb. 5.12). Die Längen der Einfahrstrecken sind für beide Richtungen leicht unterschiedlich, da die Steigung unterschiedlich ist. Da die Messungenauigkeiten der Leuchtdichte eine grosse Streuung hat, ist eine Unterscheidung in den zwei Richtungen jedoch nicht sinnvoll. Eine Unterscheidung ergibt Sinn, wenn die Steigungen stark unterschiedlich sind, oder die signalisierte Geschwindigkeit unterschiedlich ist.

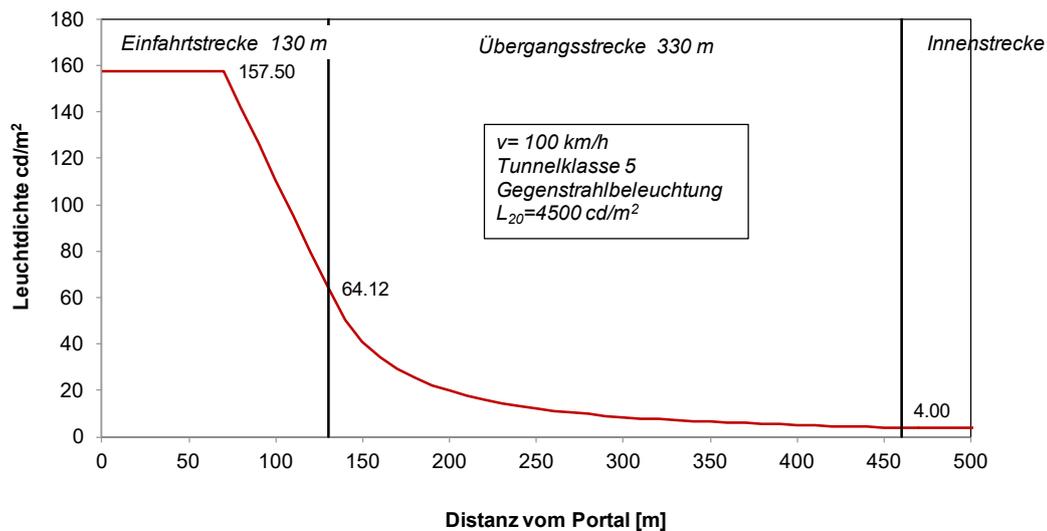


Abb. 5.11 Mindestanforderung an die Beleuchtung aus der SN 640 551-1 für das Anwendungsbeispiel.

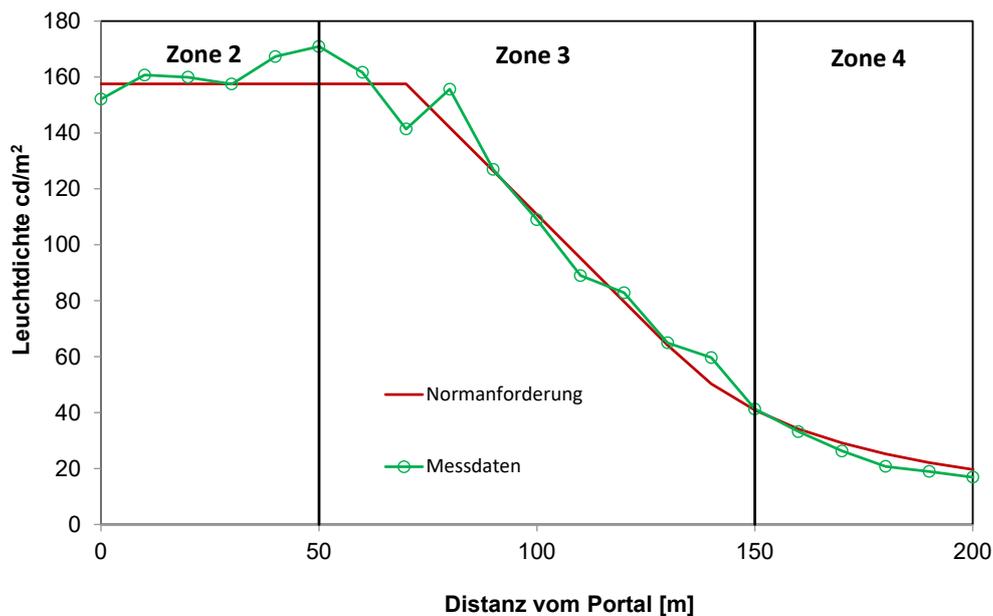


Abb. 5.12 Erforderliche (rote Linie) und gemessene Leuchtdichte (grüne Linie) im Tunnel.

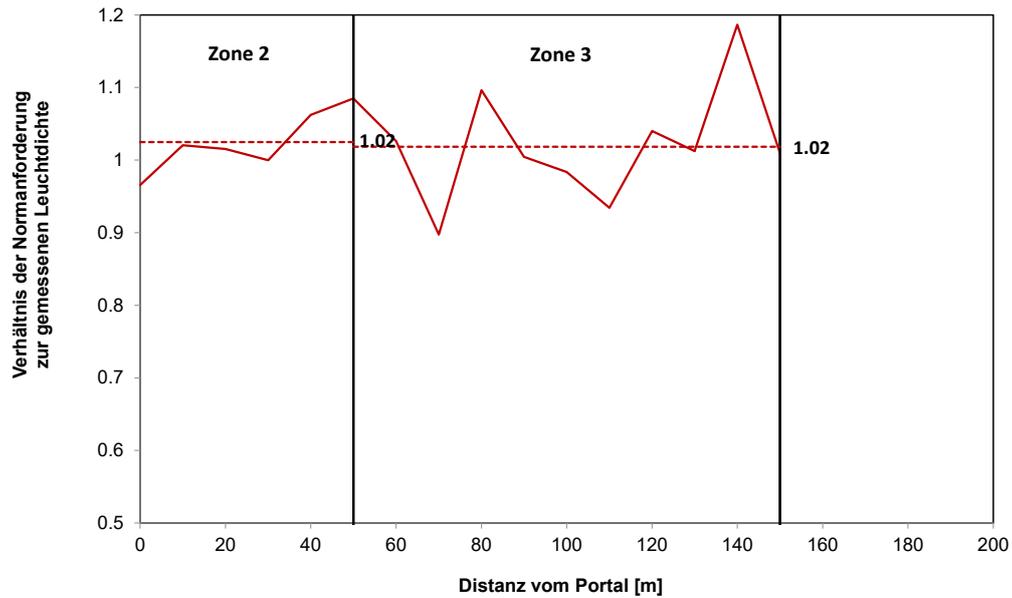


Abb. 5.13 Mittelwert für die Zonen 2 und 3 zur Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte.

Die Notbeleuchtung ist Bestandteil der Durchfahrtsbeleuchtung und an die USV (unterbrechfreie Stromversorgung) angeschlossen. Hier besteht nach ASTRA 74001 ein Abweichungsverbot. Das Abweichungsverbot vom Anschluss an die USV sowie die Signalisation der Fluchtwege wird in diesem Tunnel nicht verletzt und Massnahmen diesbezüglich sind nicht umzusetzen.

- Notbeleuchtung (Bestandteil der Durchfahrtsbeleuchtung) an USV angeschlossen;
- Brandnotleuchten alle 50 m an USV angeschlossen.

Die Beleuchtung ist somit

- normenkonform  
 nicht normenkonform

## 6 E Sicherheitsrelevante Anforderungen

<b>Inhalt</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einleitung zu den besonderen Charakteristiken</li> <li>- Beschreibung Stellenwert und Zweck der Checkliste</li> </ul>

Gemäss [3] ist für den Vollzug zu prüfen, ob eine Risikoermittlung durchzuführen ist, indem geprüft wird, ob die sicherheitsrelevanten Anforderungen gemäss UVEK-Weisungen ASTRA 74001 erfüllt sind. Diese sind nicht erfüllt, wenn eine besondere Charakteristik vorliegt oder Abweichungen von ASTRA Normen und Standards vorliegen.

In den folgenden zwei Kapiteln wird beurteilt, ob ein Vollzug des Risikokonzeptes notwendig ist.

### 6.1 E.1 Besondere Charakteristik

Kann eine oder mehrere Fragen aus der folgenden Checkliste mit *ja* beantwortet werden, so liegt eine besondere Charakteristik vor.

Bauwerk	Ist die Tunnellänge > 5 km?	Nein
	Wechselnde Umnutzung der Tunnelröhre, z.B. wechselnde Richtung bei Richtungsverkehr oder zeitweise Gegenverkehr?	Nein
	Ein-/Ausfahrten im Tunnel?	Nein
	Veränderung der Anzahl Fahrspuren in einer Tunnelröhre?	Nein
	Gibt es 4 oder mehr Fahrspuren in einer Tunnelröhre?	Nein
	Ist die Fahrspurbreite der rechten Spur < 3.50 m?	Nein
	Ist die Querneigung > 5.0% oder < 2.5%?	Nein
	Ist die Längsneigung an einer Stelle im Tunnel > 3%?	<b>Ja</b>
Verkehr	Ist beim Gegenverkehrstunnel die Verkehrsstärke > 13'300 Fzg/(Fahrspur, 24 h)?	Nicht relevant
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die Verkehrsstärke > 14'200 Fzg/(Fahrspur, 24 h)?	<b>Ja</b>
	Ist beim Gegenverkehrstunnel die Verkehrsstärke in der Spitzenstunde > 1'600 Fzg/(Fahrspur, h)?	Nicht relevant
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die Verkehrsstärke in der Spitzenstunde 1'900 Fzg/(Fahrspur, h)?	<b>Ja</b>
	Mehr als 75 h Stau pro Jahr?	<b>Ja</b>
	Ist der Anteil des Lkw -Verkehrs > 15%?	Nein
	Anteil der Anteil des Gefahrgutverkehrs > 6% vom Lkw Anteil?	Nein
	Ist beim Richtungsverkehrstunnel die signalisierte Geschwindigkeit > 100 km/h?	Nein
	Ist beim Gegenverkehrstunnel die signalisierte Geschwindigkeit > 80 km/h?	Nicht relevant
	Ist die signalisierte Geschwindigkeit bei einer Durchfahrt des Tunnels nicht konstant (Wechsel der Beschilderung)?	Nein

Die Auswertung der Checkliste ergibt, dass eine **besondere Charakteristik** im Tunnel vorliegt. Somit ist eine Risikoanalyse durchzuführen und eine weitere Prüfung ist nicht notwendig.

## 6.2 E.2. Abweichungen von Normen und Standards

<b>Inhalt</b>
- Tabellarische Zusammenstellung der Abweichungen

Die identifizierten relevanten Abweichungen von den derzeit gültigen Normen und Standards sind in Abb. 6.14 zusammengefasst.

Abb. 6.14 Überprüfung der Abweichungen von Normen und Standards.

	Sollwert	Istwert	Referenzen	Abweichung
Tunnellüftung	Absaugmenge 180 m <sup>3</sup> /s pro 200m	Absaugmenge: 80 m <sup>3</sup> /s pro km	SIA 197/2, Zf. 9.4 ASTRA 13001 ASTRA 13002	Ja
Entwässerung	Schlitzrinnen	Siphonierte Einlaufschächte alle 25 m	SIA 197/2, Zf. 8.7	Ja
Abstand Notausgang	300 m	600 m	SIA 197/2, Zf. 8.8.3.3	Ja
Fahrbahnbreite	7.75 m für 2x2 Normalprofil	7.75 m	ASTRA 11001 – Normalprofile	Nein
Längsneigung	max. 5%	3.5%	SIA 197/2, Zf. 8.2.2.2	Nein
Quergefälle	min 2.5%	2%	SIA 197/2, Zf. 8.2.3.1	Ja
Ein- Ausfahrten im Tunnel		Keine vorhanden	SIA 197/2, Zf. 8.2.4	Nein
Überwachung	Verkehrsfernseh-Anlage	Verkehrsfernseh-Anlage (ohne Ereigniserkennung)	SIA 197/2, Zf. 9.6.4 ASTRA 13005	Nein
	Automatische Branddetektion (z.B. Linienbrandmelder im Fahrraum)	Thermischer Linear-melder: Listec Kabel SEC 20	SIA 197/2, Zf. 9.6.3	
Notbeleuchtung	Teil der Durchfahrtsbeleuchtung und an USV anzuschliessen	Teil der Durchfahrtsbeleuchtung, an USV	SIA 197/2, Zf. 9.3.1.5	Nein
Verkehrsführung	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr	ASTRA 74001	Nein
Beleuchtung	Einfahrstrecke 157/64.1 cd/m <sup>2</sup>	162/64.1 cd/m <sup>2</sup>	SN 640551-1	Nein
	Übergang 64.1/12 cd/m <sup>2</sup>	64.1/ 18.2 cd/m <sup>2</sup>		
	Innenstrecke 4 cd/m <sup>2</sup>	5.8 cd/m <sup>2</sup>		

## 6.3 E.3. Schlussfolgerungen aus Kapitel 6

<b>Inhalt</b>
- Beurteilung, ob die Risikoanalyse gemäss ASTRA 19004 zu vollziehen ist.

Aus den Abweichungen in Bezug auf Normen und Standards sowie aufgrund der besonderen Charakteristik, die in Kapitel 6.1 festgestellt wurde, ist die

- Risikoanalyse zu vollziehen
- Risikoanalyse nicht zu vollziehen

## 7 F. Systemrepräsentation

### Inhalt

- Einleitung
- Definition des Ist-Zustandes

In diesem Kapitel wird das System repräsentiert, d.h. der vorhandene Tunnel wird unter Verwendung der definierten Indikatoren beschrieben und damit wird ein Abbild der Wirklichkeit geschaffen, um die Risiken im System zu berechnen. Die Systemrepräsentation ist ein wesentlicher Teil der Modellbildung.

Generell wird in dieser Methode das System unter Verwendung von homogenen Segmenten repräsentiert. Tunnelsegmente sind homogen, wenn sich die Eigenschaften der verwendeten Indikatoren nicht ändern. Die Anzahl der homogenen Segmente ergibt sich aus den Änderungen der Indikatoren über die Tunnellänge. Die Anzahl der homogenen Segmente ist auch bedingt durch den Detaillierungsgrad. Ein grösserer Detaillierungsgrad beinhaltet in der Regel eine grössere Anzahl an homogenen Segmenten. Im ersten Schritt werden die homogenen Segmente für den Ist-Zustand definiert.

Der Ist-Zustand entspricht in Bezug auf die Bauwerkscharakteristiken dem Zustand 2014 wie in Abb. 5.7 zusammengestellt.

Der Ist-Zustand in Bezug auf die Verkehrscharakteristiken entspricht gemäss ASTRA 89005 dem Zustand im Jahr 2029. Die Verkehrscharakteristiken sind in Abb. 5.4 zusammengestellt.

### 7.1 F.1. Detaillierungsgrad

#### Inhalt

- Detaillierungsgrad gemäss Projektphase
- Wenn vereinfachter Ansatz gewählt wird sind die verwendeten Indikatoren anzugeben.

Gemäss der Projektphase, die in Kapitel 2.1.1 definiert ist, ist der

- vereinfachte Ansatz der Risikoanalyse  
 detaillierte Ansatz der Risikoanalyse

zu wählen.

### 7.2 F.2. Tunnelkomponenten

#### Inhalt

- Beschreibung der prinzipiell betrachteten Komponenten (z.B. Richtung 1 und Richtung 2).

Der Tunnel besteht aus zwei Röhren und wird im Richtungsverkehr betrieben. Dadurch kann der Tunnel mit zwei Komponenten beschrieben werden. Die Tunnelkomponente 1 entspricht der Tunnelröhre mit Fahrtrichtung zu Portal 2, die Tunnelkomponente 2 entspricht der Tunnelröhre in Fahrtrichtung zu Portal 1.

In den folgenden 2 Kapiteln werden die homogenen Segmente in den Tunneln definiert.

## 7.3 F.3. Homogene Segmente

### 7.3.1 F.3.2 Homogene Segmente in Tunnelkomponente 1

Die Aufteilung in die homogenen Segmente für die Tunnelkomponente 1 (von Portal 1 nach Portal 2 – Richtung Portal 2) ist in Abb. 7.15 dargestellt. Eine tabellarische Zusammenfassung der homogenen Segmente ist in Abb. 7.16 gegeben.

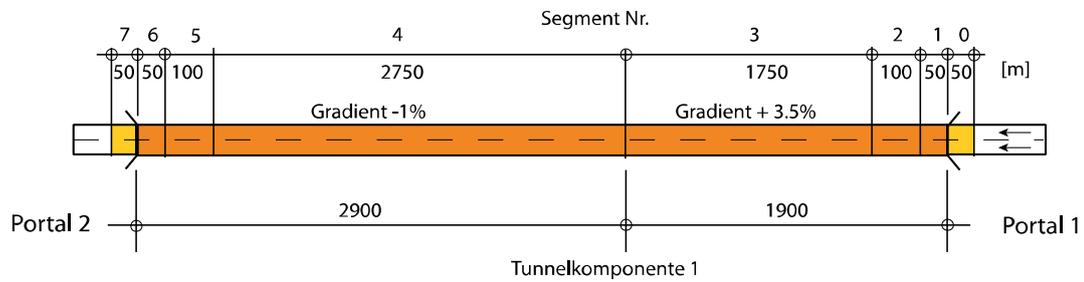


Abb. 7.15 Homogene Segmente und Segmentennummer für die Tunnelkomponente 1.

Abb. 7.16 Homogene Segmente und Auswahl an Indikatoren für Tunnelkomponente 1.

	Pr. Nr.	Länge	Kurvenradius	Geschwindigkeit	DTV	Verkehr pro Richtung	Schwerverkehr	Gradient	Spuren	
										(km)
↓	Startpunkt	0								
	Portal 1	50	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	3.5	2
		100	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	3.5	2
		200	100	Inf.	100	70'000	35'000	9	3.5	2
	Hochpunkt	1950	1750	Inf.	100	70'000	35'000	9	3.5	2
		4700	2750	Inf.	100	70'000	35'000	9	-1	2
		4800	100	Inf.	100	70'000	35'000	9	-1	2
	Portal 2	4850	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	-1	2
	Endpunkt	4900	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	-1	2

	Pr. Nr.	TVC	Fahrspurweite	Verkehrsführung	Ein/Ausfahrten	Beleuchtung	Notbeleuchtung	Abstand Notausgänge	
									(km)
↓	Startpunkt	0							
	Portal 1	50	E	3.75	Richtung	Keine			
		100	E	3.75	Richtung	Keine	2.1	Ja	600
		200	E	3.75	Richtung	Keine	2.1	Ja	600
	Hochpunkt	1950	E	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
		4700	E	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
		4800	E	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
	Portal 2	4850	E	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
	Endpunkt	4900	E	3.75	Richtung	Keine			

	Pr. Nr.	Stautunden	ADR Klasse	Gefahrguttransporte	Entwässerungssystem	Abstand Einläufe	Schlitzrinnenöffnung	Querneigung	
									(km)
↓	Startpunkt	0							
	Portal 1	50	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		100	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		200	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Hochpunkt	1950	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		4700	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		4800	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Portal 2	4850	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Endpunkt	4900	210	A	6	Diskret	25	Keine	2%

### 7.3.2 F.3.1 Homogene Segmente in Tunnelkomponente 2

Von den betrachteten Indikatoren ändern sich über die Tunnellänge nur die Zonen und der Gradient. Damit ergibt sich eine Anzahl von nur 7 homogenen Segmenten.

Die Aufteilung in die homogenen Segmente ist in Abb. 7.17 dargestellt. Eine tabellarische Zusammenfassung der homogenen Segmente ist in Abb. 7.18 gegeben.

Abb. 7.17

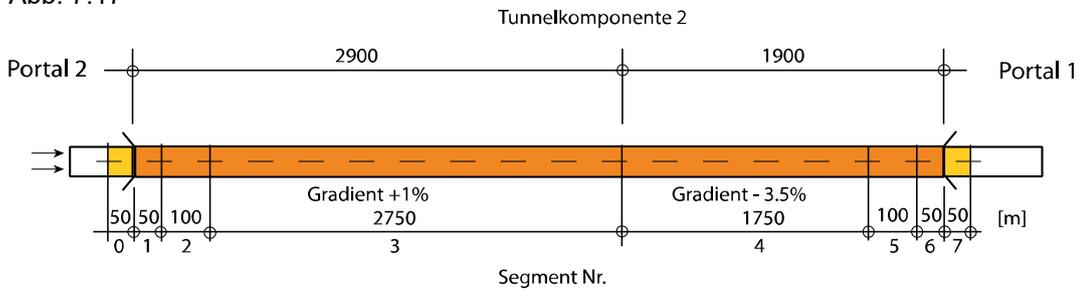


Abb. 7.17 Homogene Segmente und Segmentennummer für die Tunnelkomponente 2.

Abb. 7.18 Homogene Segmente und Auswahl an Indikatoren für Tunnelkomponente 2.

	Pr. Nr.	Länge	Kurvenradius	Geschwindigkeit	DTV	Verkehr pro Richtung	Schwerverkehr	Gradient	Spuren	
		(km)	(m)	(m)	(km/h)	(Fzg/d)	(Fzg/d)	(%)	(%)	Anzahl
↓	Startpunkt	4900								
	Portal 2	4850	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	+1	2
		4800	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	+1	2
		4700	100	Inf.	100	70'000	35'000	9	+1	2
	Hochpunkt	1950	2750	Inf.	100	70'000	35'000	9	+1	2
		200	1750	Inf.	100	70'000	35'000	9	-3.5	2
		100	100	Inf.	100	70'000	35'000	9	-3.5	2
	Portal 1	50	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	-3.5	2
	Endpunkt	0	50	Inf.	100	70'000	35'000	9	-3.5	2

	Pr. Nr.	TVC	Fahrspurbreite	Verkehrsführung	Ein/Ausfahrten	Beleuchtung	Notbeleuchtung	Abstand Notausgänge	
		(km)	(m)			(cd/m <sup>2</sup> )		(m)	
↓	Startpunkt	4900							
	Portal 2	4850	C	3.75	Richtung	Keine			
		4800	C	3.75	Richtung	Keine	2.1	Ja	600
		4700	C	3.75	Richtung	Keine	2.1	Ja	600
	Hochpunkt	1950	C	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
		200	C	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
		100	C	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
	Portal 1	50	C	3.75	Richtung	Keine	4	Ja	600
	Endpunkt	0	C	3.75	Richtung	Keine			

	Pr. Nr.	Stautunden	ADR Klasse	Gefahrguttransporte	Entwässerungssystem	Abstand Einläufe	Schlitzrinnenöffnung	Querneigung	
		(h)		(%)		(m)			
↓	Startpunkt	4900							
	Portal 2	4850	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		4800	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		4700	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Hochpunkt	1950	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		200	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
		100	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Portal 1	50	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%
	Endpunkt	0	110	A	6	Diskret	25	Keine	2%

## 8 G. Risikoermittlung für den Ist-Zustand

### Inhalt

- Qualitative Einschätzung der Situation und der erwarteten Risiken
- Beschreibung von Gefahrenidentifikationssitzungen und Zusammenfassung

Allein durch die relativ hohe Verkehrsstärke ist zu erwarten, dass die Anzahl an Unfällen und Fahrzeugbränden relativ hoch ist, auch wenn die Unfallrate mit Verletzten pro Fahrzeugkilometer eher im unteren Bereich liegen wird, da keine besonderen Gefahrenstellen, wie beispielsweise Ein- und Ausfahrten oder Kurven im Tunnel vorhanden sind.

Die Steigungsstrecke im Tunnel mit einem Gradienten von 3.5% wird ebenfalls eher einen kleinen Einfluss auf die Unfallrate haben. Alle anderen Indikatoren deuten nicht auf eine besondere Gefährdung oder Gefahrenstelle hin.

In Bezug auf die Tunnelbrände (ohne Gefahrgutbrände) ist zu erwarten, dass im Steigungsstück in Richtung Portal 2 die Brandrate leicht erhöht ist. Ein Grund hierfür ist, dass es durch die leicht erhöhte Unfallrate auch zu mehr Bränden nach Unfällen kommen kann. Ein weiterer Grund ist, dass die Steigung zu einer Überhitzung von Motoren führen kann, was sich auch in einer erhöhten Brandrate widerspiegelt.

Für die Richtung Portal 1 beträgt der Absolutwert der Steigung 1% (km 0.00 – km 2.9). Diese geringe Steigung wird keinen Einfluss auf die Brandrate im Tunnel haben. Auch die Gefällestrecke (km 2.9 – km 4.8) wird keinen Einfluss auf die Brandrate haben, da eine Überhitzung von Bremsen und Motoren nicht zu erwarten ist.

Auf der anderen Seite ist zu erwarten, dass die Konsequenzen im Ist-Zustand insbesondere bei Tunnelbränden relativ hoch sein werden, da der Abstand zwischen den Notausgängen gross ist und die bestehende Tunnellüftung im Brandfall nicht zu einer signifikanten Vergrösserung der Selbstrettungswahrscheinlichkeit beitragen kann. Positiv ist, dass der Tunnel über ein Überwachungssystem und eine beleuchtete Ausschilderung der Notausgänge verfügt.

In Bezug auf Gefahrgutunfälle gibt es im Tunnel keine besonderen Massnahmen, die zu einer Verringerung der Unfälle mit Gefahrgütern führen würden. Es ist zu erwarten, dass die Ereignisrate von Gefahrgutunfällen im mittleren Bereich liegt. Zudem ist zu erwarten, dass die Akzeptanzprüfung nach StFV nur knapp erfüllt wird, also im ALARP Bereich liegt, da die Verkehrsstärke relativ hoch ist.

Massnahmen, die die Konsequenzen von Gefahrgutunfällen reduzieren, sind vorhanden und in Tabelle 1.12 zusammengestellt. Nicht alle diese Massnahmen entsprechen den heute gültigen Normen.

### 8.1 G.1. Allgemeine Verkehrsrisiken

Zu den allgemeinen Verkehrsrisiken gehören Unfälle und Tunnelbrände infolge von Fahrzeugbränden. Zudem werden Gefahrgutrisiken berechnet, welche sowohl als Teil vom Gesamtrisiko berechnet werden als auch gesondert beurteilt werden.

In Abb. 8.19 ist die Variation der Unfallrate (Verletztenunfälle) pro Millionen Fahrzeugkilometer über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 dargestellt. Die Unfallrate wurde unter Verwendung der Software Applikation TRANSIT, die von Matrisk GmbH und HOJ Consulting GmbH entwickelt wurde, ermittelt.

Die blaue Linie repräsentiert die Unfallrate im Tunnel. Die schwarzen Linien bei km 0.00 und km 4.80 repräsentieren das Portal 2 (Tunneleinfahrt) und das Portal 1 (Tunnelausfahrt).

In Abb. 8.19 ist erkennbar, dass die Unfallrate in den Portalbereichen deutlich erhöht ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch den Helligkeitswechsel im Ein- und Ausfahrtsbereich des Tunnels das Auge des Autofahrers eine gewisse Zeit für die Adaption an die veränderten Lichtverhältnisse benötigt. In dieser Zeit sind die Sehfähigkeit und damit die Reaktionsfähigkeit des Fahrers leicht eingeschränkt.

Bei km 0.15 nach Einfahrt (respektive Ausfahrt) in den Tunnel (Portal 1) ist diese Adaption abgeschlossen. Die Unfallrate im Portalbereich liegt bei etwa 0.09 Unfälle/Mio. Fzg. km. Kurz vor dem Portal ist die Unfallrate noch höher und liegt bei etwa 0.10 Unfälle/Mio. Fzg. km.

Im Tunnel bei km 2.95 ist ein leichter Anstieg der Unfallrate zu erkennen. Dieser ist auf die Änderung der Längsneigung im Tunnel zurückzuführen.

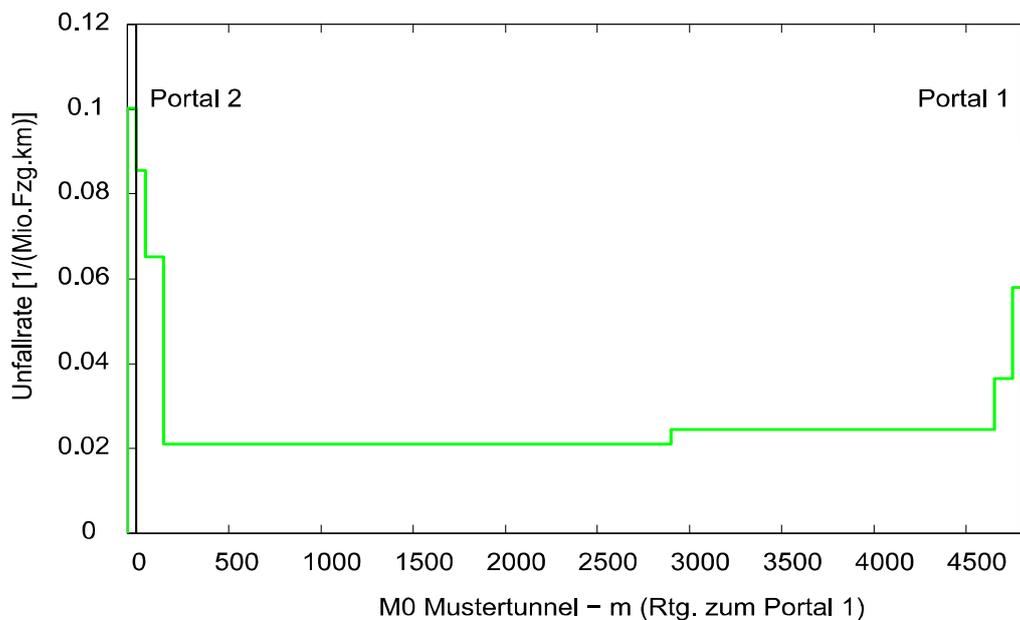


Abb. 8.19 Variation der Unfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 im Ist-Zustand.

Abb. 8.20 zeigt die Variation der Unfallrate (Verletztenunfälle) pro Millionen Fahrzeugkilometer über die Tunnellänge in Richtung Portal 2. In dieser Richtung beträgt die Unfallrate im Einfahrtsportal (Portal 1) etwa 0.10 Unfälle /Mio. Fzg. km. Die Unfallrate im Tunnel ist für beide Richtungen in etwa gleich.

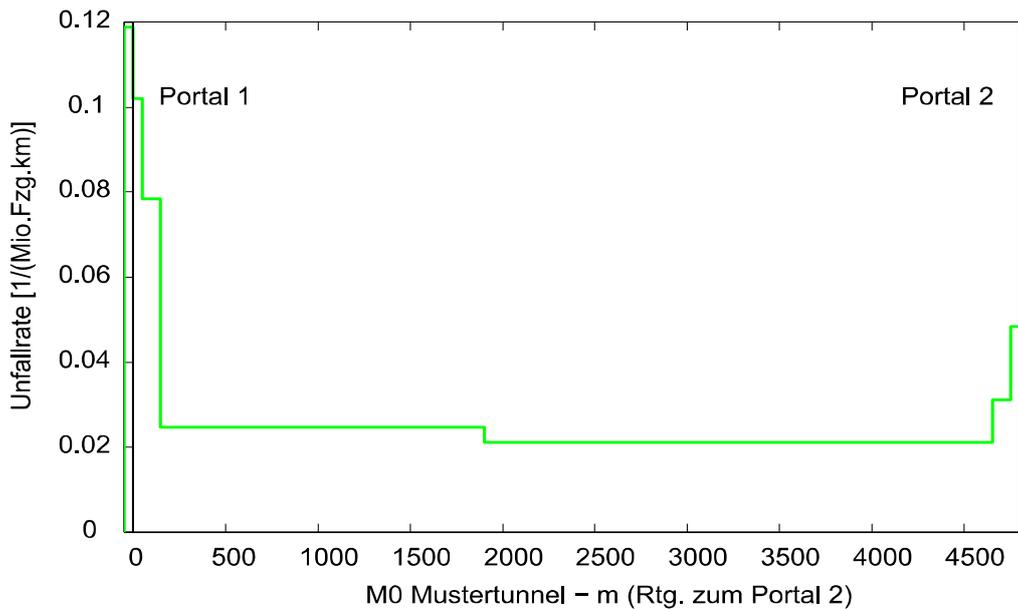


Abb. 8.20 Variation der Unfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 im Ist-Zustand.

Im Mittel beträgt die Unfallrate im Tunnel im Ist-Zustand 0.026 Unfällen pro Millionen Fahrzeugkilometer.

Bei der gegebenen Verkehrsstärke sind im Mittel pro Jahr 3.28 Unfälle mit Personenschäden im Tunnel zu erwarten. Die Anzahl Verletzte infolge von Unfällen pro Jahr berechnet sich zu 5.72.

Die Anzahl Todesfälle infolge von Unfällen im gesamten Tunnel berechnet sich zu 0.068 pro Jahr.

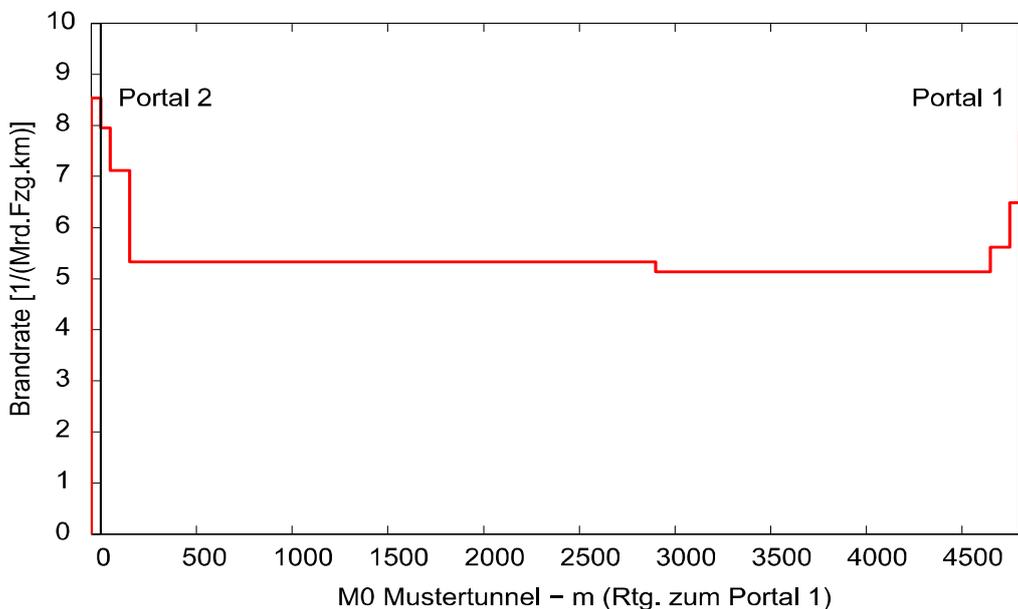


Abb. 8.21 Variation der Brandrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 im Ist-Zustand.

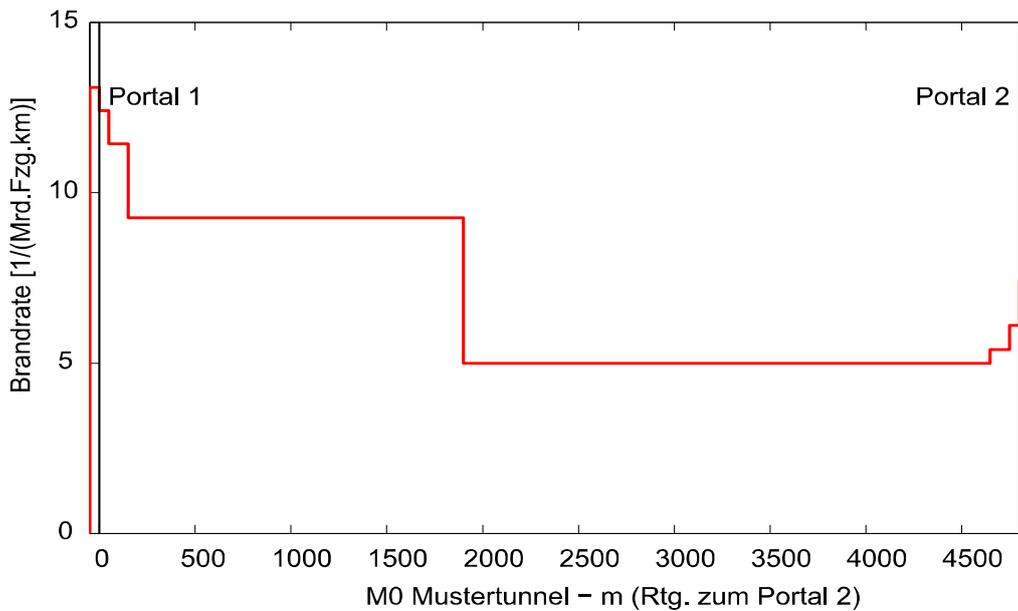


Abb. 8.22 Variation der Brandrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 im Ist-Zustand.

In Abb. 8.21 ist die Variation der Brandrate von Fahrzeugen über die Tunnellänge dargestellt. Die Brandrate ist in den Portalbereichen etwas erhöht. In den Portalbereichen sind die Konsequenzen nach Bränden jedoch deutlich geringer, da die Distanz zum Portal geringer und somit die Selbstrettungsmöglichkeiten dort grösser sind.

Im Mittel liegt die Brandrate bei 0.006 Bränden pro Millionen Fahrzeugkilometer und entspricht damit der mittleren Brandrate in Tunneln in der Schweiz.

Pro Jahr ist mit etwa 0.8 Fahrzeugbränden im gesamten Tunnel zu rechnen.

Die berechnete Anzahl an Todesfällen infolge von Fahrzeugbränden (ohne Gefahrgut) liegt bei 0.46 pro Jahr. Dieser Wert ist relativ hoch und ist insbesondere auf die nicht ausreichende Lüftung und den grossen Abstand an Notausgängen von 600 m zurückzuführen.

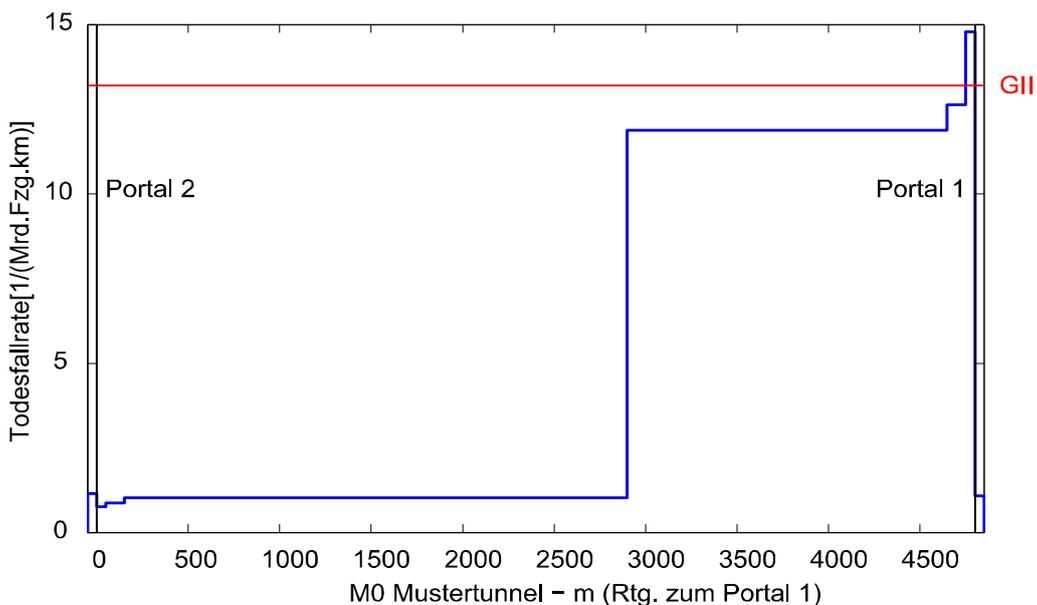


Abb. 8.23 Variation der Todesfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 im Ist-Zustand.

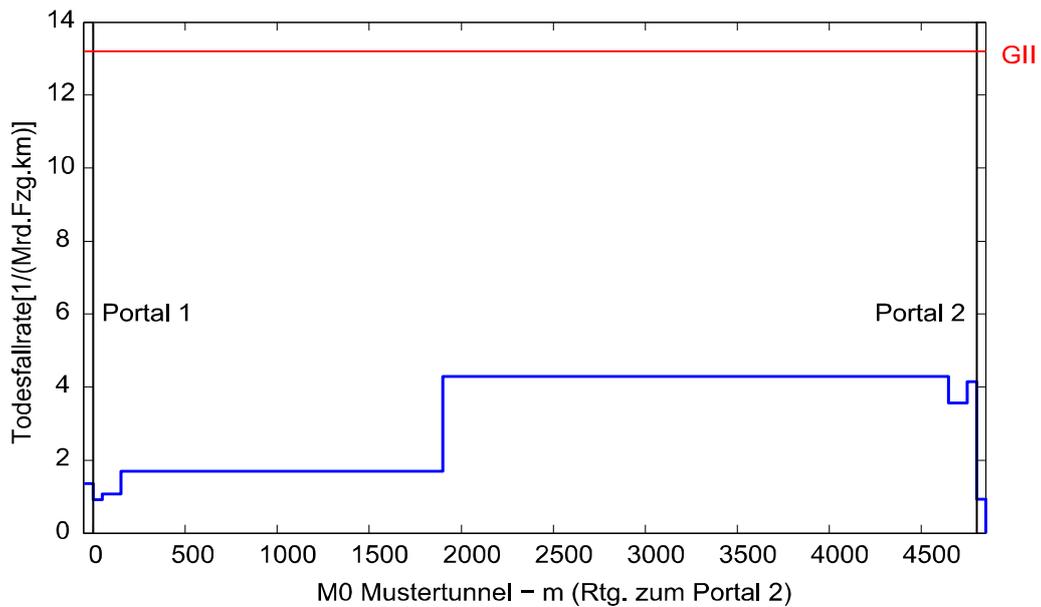


Abb. 8.24 Variation der Todesfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 im Ist-Zustand.

In Abb. 8.23 und Abb. 8.24 sind die Todesfallraten in Mrd. Fzg. km über die Tunnellänge für die zwei Richtungen gegeben. Die Todesfallraten im Einfahrtbereich liegen generell unter dem akzeptierbaren Grenzwert von 13.2 Tote pro Mrd. Fzg. km. Im Innenbereich liegt die Todesfallrate unterhalb des Grenzwertes GII.

Für den Tunnel liegt die gesamte Todesfallrate unter dem Grenzwert GII und oberhalb von GI und somit im ALARP Bereich.

In Abb. 8.25 sind die Ergebnisse der Analyse im Ist-Zustand für die allgemeinen Verkehrsrisiken zusammengestellt.

Abb. 8.25 Zusammenfassung der Ergebnisse der allgemeinen Verkehrsrisiken für den Ist-Zustand im Tunnel.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.4602	2.408	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.0030	0.0089	0.00018
<b>Gesamt</b>	0.5315	8.136	4.051
<b>Verkehr</b>			
	125.20	Mio. Fzg. km/Jahr	
<b>Unfallrate</b>	0.026	1/Mio. Fzg. km	
<b>Brandereignisrate</b>	6.123	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Todesfallrate</b>	4.246	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Verletztenrate</b>	0.065	1/Mio. Fzg. km	

## 8.2 G.2. Gefahrgutrisiken

Es können drei Hauptszenarien unterschieden werden: Lachenbrände, Explosionen und toxische Unfälle. In Abb. 8.26 sind die Mittelwerte für die Anzahl Todesfälle infolge Gefahrgutereignissen zusammengestellt.

Abb. 8.26 Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr.

	Lachenbrände	Toxische Unfälle	Explosionen	Alle Gefahrgutereignisse
M0: Ist-Zustand	0.001737	0.001116	0.000112	0.001979
Anteil	58.6%	37.6%	3.8%	100.0%

Aus Abb. 8.26 ist erkennbar, dass die Anzahl Todesfälle infolge Gefahrguttransporten im Vergleich zu den allgemeinen Verkehrsrisiken sehr gering ist. Es wird in der gesamten Tunnelanlage mit einem Erwartungswert von 0.002 Todesfällen pro Jahr gerechnet. Die Anzahl an Verletzten in der gesamten Tunnelanlage liegt bei 0.009 Verletzten pro Jahr.

Aus Abb. 8.26 ist auch ablesbar, dass die Szenarien Lachenbrand und toxische Unfälle die grössten Beiträge zum Gesamtrisiko leisten.

Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Abstände zwischen den Einlaufschächten 25 m betragen und grosse Lachenbrandes haben eine höhere Wahrscheinlichkeit. Insbesondere im Bereich, in dem die Steigung 3.5% beträgt, ist mit sehr grossen Bränden zu rechnen. Hinzu kommt, dass sich durch die geringe Lüfterleistung und der Abstand der Notausgänge, die Konsequenzen infolge eines Grossbrandes vergrössern.

In Abb. 8.27 - Abb. 8.28 ist die Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen infolge von Gefahrgutereignissen im Mustertunnel normiert auf 100 m getrennt für beide Richtungen gegeben. Die blauen Linien zeigen die Akzeptanzkriterien nach Störfallverordnung. Die Überschreitungshäufigkeit liegt im Übergangsbereich des Akzeptanzkriteriums. Für keine der Richtungen ist das Akzeptanzkriterium überschritten.

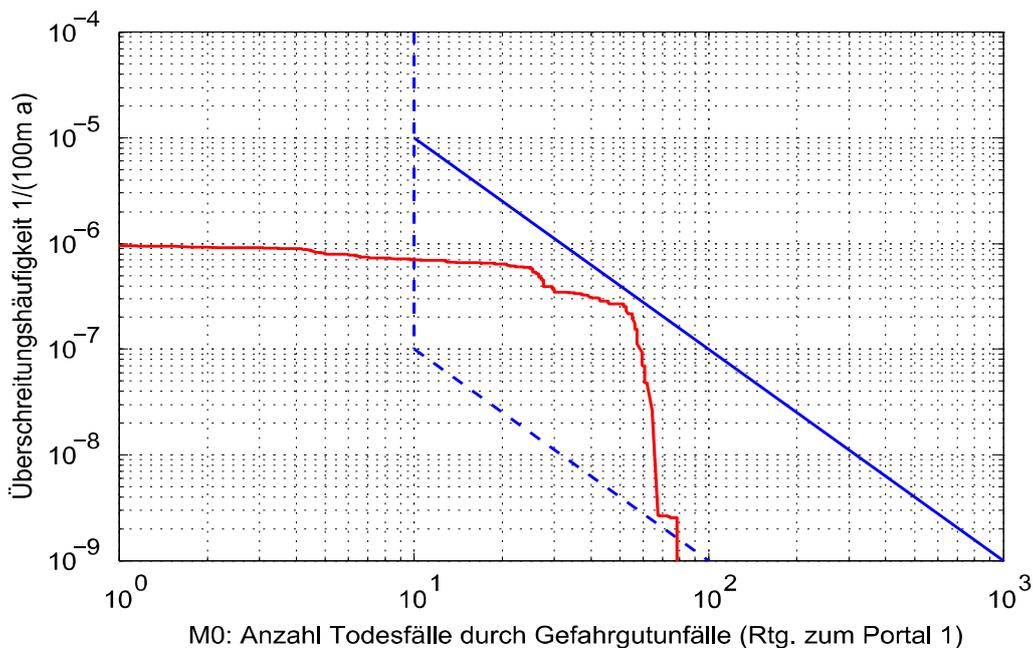


Abb. 8.27 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel in Richtung Portal 1.

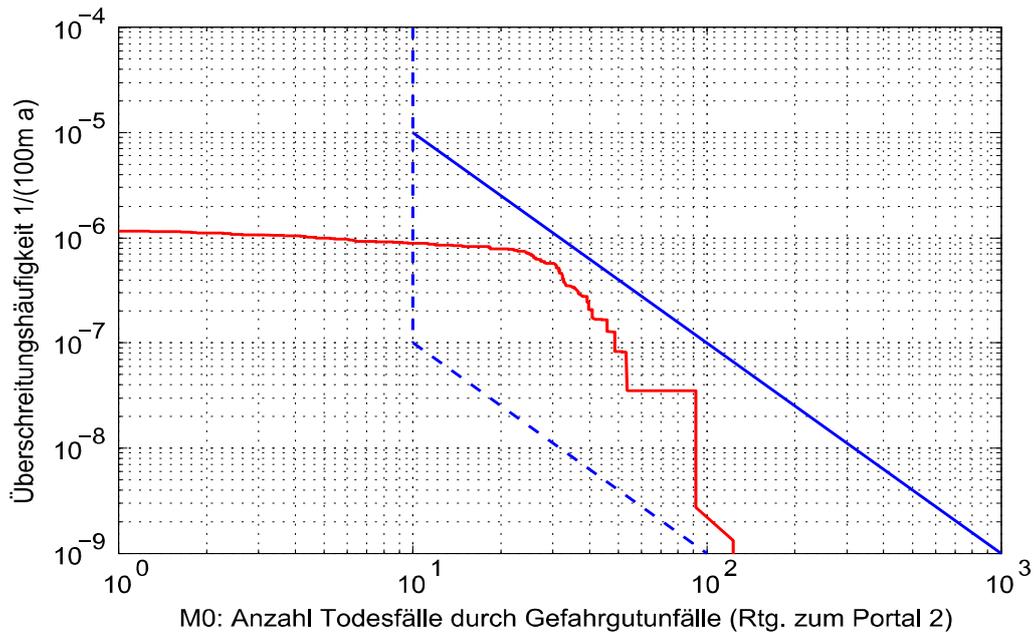


Abb. 8.28 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2.

Betrachtet man die Häufigkeit von Gefahrgutereignissen im Mustertunnel, so ist im Mittel mit 0.0002 Ereignissen pro Jahr zu rechnen. Dies entspricht einem Ereignis etwa alle 5556 Jahre. Daraus wird deutlich, dass das Risiko im Vergleich zu den allgemeinen Verkehrsrisiken sehr gering ist.

Es wird aufgrund der Ergebnisse empfohlen, den Tunnel zusätzlich nach

- ADR-CH zu überprüfen
- ADR-CH nicht zu überprüfen

### 8.3 G.3 Bewertung des Ist-Zustandes

Die Risikoermittlung im Ist-Zustand (erste Risikoermittlung) hat gezeigt, dass das Risiko

- kleiner als  $G_I$  ist
- grösser als  $G_I$  ist

Damit

- sind risikoreduzierende Massnahmen zu untersuchen
- ist das Risiko im Ist-Zustand tolerierbar

## 9 H. Risikoreduzierende Massnahmen

### Inhalt

- Alle relevanten Massnahmen müssen identifiziert werden.
- Gegebenenfalls (bei einer grossen Anzahl möglicher Massnahmen) können die identifizierten Massnahmen nach Relevanz oder grob eingeschätzter Effizienz sortiert werden.
- Der Identifikationsprozess wird in einem Unterkapitel beschrieben.
- In den weiteren Unterkapiteln werden alle relevanten Massnahmen detailliert beschrieben.

Die Analyse des Ist-Zustandes hat gezeigt, dass risikoreduzierende Massnahmen notwendig sind (vgl. Kap. 8.3). Um zu gewährleisten dass alle relevanten Massnahmen identifiziert werden, ist es nützlich Expertenmeinungen von verschiedenen Seiten einzuholen. Diese Identifikation kann in Form eines Brainstorming-Meeting erfolgen. Der Prozess entspricht der Gefahren-Identifikation, die in einer sogenannten HAZID (Hazard-Identification) Session durchgeführt werden kann.

Im Anwendungsbeispiel wird vorausgenommen, dass eine Identifikation der möglichen Massnahmen dazu geführt hat, dass (nur) die Massnahmen M1 – M4 (siehe unten) relevant sind. (Diese Annahme ist eine starke Vereinfachung, da es normalerweise mehr mögliche Massnahmen gibt.)

Um die Methodik der Risikoermittlung im Anwendungsbeispiel dazulegen, werden beispielhaft folgende Massnahmen untersucht und diskutiert:

- **M1:** Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m;
- **M2:** Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen;
- **M3:** Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung;
- **M4:** Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h;
- **MK:** Massnahmenkombinationen.

### 9.1 H.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m

Im Ist-Zustand sind alle 600 m Querverbindungen zur gegenüberliegenden Tunnelröhre vorgesehen. Die bestehenden Querverbindungen entsprechen bezüglich Dimension bereits den heute geltenden Vorschriften.

Die Massnahme sieht vor, die Abstände der Notausgänge von 600 m auf 300 m zu halbieren und die damit zusammenhängenden Elemente (Signalisierung, Beleuchtung, etc.) normengerecht auszuführen. Jede dritte Querverbindung wird befahrbar ausgebildet.

#### Kosten der Massnahme

Für die Umsetzung der Massnahme M1 sind Investitionskosten von 5 Mio. CHF bestimmt worden (hier: fiktiver Wert!). Die Betriebskosten sind zu vernachlässigen. Für die Risikoanalyse des Anwendungsbeispiels ist davon auszugehen, dass diese Kosten alle anfallenden Aufwände (direkte, indirekte) abdecken. Zur Bestimmung der Finanzierungskosten ist ein Zinssatz von 2% zu verwenden. Die Lebensdauer der Massnahmen M1 beträgt 50 Jahre.

Abb. 9.29 Eingangswerte für die Massnahmenkostenrechnung der Massnahme M1.

Eingangsgrösse	Wert	Einheit	Bemerkung
Investitionskosten	5'000'000	CHF	(Projektstand 03.2014)
Lebensdauer	50	Jahre	Gemäss SIA
Annuität	159'116	CHF/a	Gemäss Kap. 0

### Wirkung der Massnahme

Die Verringerung der Fluchtwegdistanz führt dazu, dass sich die Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelbenutzer im Ereignisfall verbessern. Die Selbstrettung ist bei Brandereignissen und anderen Gefahrgutereignissen entscheidend. Der Abstand von 600 m zwischen den Querverbindungen im Ist-Zustand ist sehr gross. Maximal müssten die Tunnelbenutzer im Ereignisfall 600 m bis zur nächsten Querverbindung zurücklegen, unter der Annahme, dass das Ereignis nicht überquert werden kann. Dies ist insbesondere für grössere Brandereignisse der Fall. Eine Fluchtwegdistanz von 600 m ist relativ gross. Die Verringerung des Abstandes zwischen den Fluchtwegen auf 300 m verringert die mittlere Fluchtwegdistanz und erhöht damit die Selbstrettungsmöglichkeiten.

Die Massnahme M1 wirkt nur auf der Ebene der Konsequenzen. Durch diese Massnahme werden keine Ereignisse verhindert und auch das Ausmass von Ereignissen nicht verringert.

Abb. 9.30 Wirkung der Massnahme M1 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen des allgemeinen Verkehrsgeschehens.

Ereignisse	
Unfälle	kein Effekt
Brände	kein Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	positiver Effekt (Verringerung)
Tote	positiver Effekt (Verringerung)

Abb. 9.31 Wirkung der Massnahme M1 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen bei Gefahrgutereignissen.

Ereignisse	
Explosion	kein Effekt
Toxischer Unfall	kein Effekt
Gefahrgutbrand	kein Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	positiver Effekt (Verringerung)
Tote	positiver Effekt (Verringerung)

## 9.2 H.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen

Das im Ist-Zustand bestehende Entwässerungssystem ist ein Trennsystem mit einzelnen, siphonierten Einlaufschächten alle 25 m. Die Querneigung ist über die gesamte Länge des Tunnels gleich (2% Neigung). Die Entwässerung führt über einen Ölabscheider in einen Vorfluter. Die Massnahme beinhaltet folgende Verbesserungen:

- Einbau einer durchgehenden Schlitzrinne je Tunnelröhre;
- Siphonierte Einlaufschächte alle 50 m mit einem Schluckvermögen von 100 l/s;
- Anschluss der Entwässerung an ein ausreichend dimensioniertes Rückhaltebecken.

### Kosten der Massnahme

Für die Umsetzung der Massnahme M2 sind Investitionskosten von 10 Mio. CHF bestimmt worden (hier: fiktiver Wert!). Die Betriebskosten sind zu vernachlässigen. Für die Risikoanalyse des Anwendungsbeispiels ist davon auszugehen, dass diese Kosten alle anfallenden Aufwände (direkte, indirekte) abdecken. Zur Bestimmung der Finanzierungskosten wird ein Zinssatz von 2% verwendet. Die Lebensdauer der Massnahme M2 beträgt 80 Jahre.

Abb. 9.32 Eingangswerte für die Kostenrechnung der Massnahme M2.

Eingangsrösse	Wert	Einheit	Bemerkung
Investitionskosten	10'000'000	CHF	(Projektstand 03.2014)
Lebensdauer	80	Jahre	Gemäss SIA
Annuität	251'607	CHF/a	Gemäss Kap. 0

### Wirkung der Massnahme

Im Ist-Zustand sind diskrete Einlaufschächte alle 25 m im Tunnel angeordnet. Im Falle eines Austritts von Gefahrgut im Tunnel bilden sich zwei Lachen. Die erste Lache läuft vom Gefahrguttransporter zum Tunnelrand bzw. zum Bankett. Die Grösse dieser Lache ist abhängig von der Quer- und der Längsneigung und von der Menge, die freigesetzt wird.

Die zweite Lache bildet sich am Tunnelrand zwischen Ereignisort und Entwässerung. Bei einer diskreten Entwässerung hat die Lache eine mittlere Längenausbreitung von 12.5 m im Ist-Zustand. Die Fläche der Lache ist zudem proportional zur Querneigung im Tunnel.

Durch die Massnahme werden beide Lachengrössen beeinflusst. Durch die Erhöhung der Querneigung wird die erste Lache kleiner. Dieser Effekt wirkt sich insbesondere bei grosser Längsneigung aus. In Bereichen, in denen die Längsneigung klein ist, hat die Erhöhung der Querneigung auf die erste Lache einen kleinen Effekt.

Durch die Schlitzrinne wird insbesondere die zweite Lache beeinflusst. Je nach Grösse der Schlitzöffnung läuft das Gefahrgut direkt ab und die Grösse der zweiten Lache verringert sich dementsprechend.

Da sich die Energiefreisetzung im Brandfall direkt aus der Grösse der Lache ergibt, beeinflusst die Massnahme die Ereignisgrösse, also das Ausmass eines Lachenbrandes.

Die Massnahme hat kaum einen Einfluss auf normale Fahrzeugbrände. Damit hat die Wirkung auf das normale Verkehrsgeschehen und die daraus resultierenden Ereignisse keinen Effekt.

Abb. 9.33 Wirkung der Massnahme M2 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen des allgemeinen Verkehrsgeschehens.

Ereignisse	
Unfälle	kein Effekt
Brände	kein Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	kein Effekt
Tote	kein Effekt

Abb. 9.34 Wirkung der Massnahme M2 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen bei Gefahrgutereignissen.

Ereignisse	
Explosion	kein Effekt
Toxischer Unfall	kein Effekt
Gefahrgutbrand	positiver Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	Indirekt positiver Effekt (Verringerung)
Tote	Indirekt positiver Effekt (Verringerung)

### 9.3 H.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung

Eine Auslegung der Entrauchungsanlage nach der Richtlinie ASTRA 13001, Version 2.1, August 2008, würde dazu führen, dass etwa 180 m<sup>3</sup>/s Rauchgase über eine Länge von 200 m abgesaugt würden. Diese Absaugmenge wird noch erhöht, wenn vorgesehen ist, dass gleichzeitig Zuluft zugeführt wird. Eine aktive Kontrolle der Längsströmung stellt zudem sicher, dass die Strömung von beiden Seiten der 200 m langen Entrauchungszone erfolgen würde.

Die aktuell eingebaute Tunnellüftung wird auf eine, den heutigen Normen entsprechende Tunnellüftung umgebaut (Abluftklappen alle 100 m sowie Längslüftung mit Strahlventilatoren, Rauchdetektion, Strömungsmessungen, Lüftungssteuerungen etc.). Massgebend für die Situation nach Umsetzung dieser Massnahmen sind die Festlegungen in der ASTRA 13001. Nachfolgend ist das zugrunde zulegende Lüftungssystem mit Absaugung und Zuluft schematisch dargestellt:

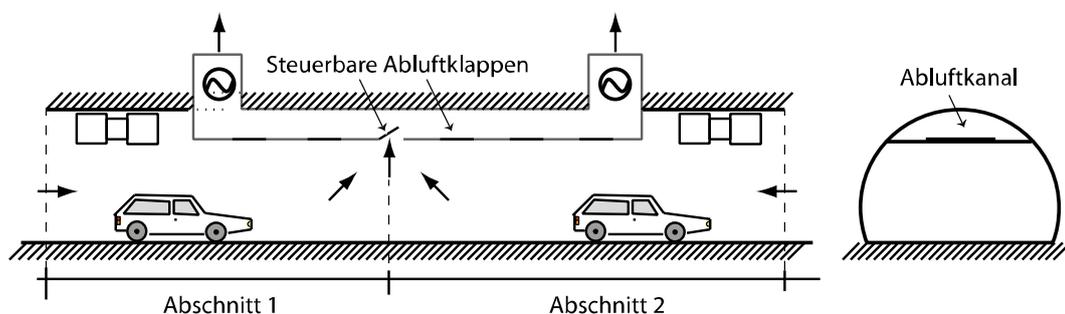


Abb. 9.35 Lüftungssystem Mustertunnel nach Umsetzung Massnahmen.

In Kapitel 5.3.1 ist der Ist-Zustand dem richtlinienkonformen Zustand gegenübergestellt.

Abb. 9.36 Überblick über die Absaugmengen und Kontrollkonfiguration im Tunnel.

	Ausführung Tunnel (Ist-Zustand)	Richtlinienkonforme Ausführung
Absaugmengen über 200 m	16 m <sup>3</sup> /s	180 m <sup>3</sup> /s
Aktive Kontrolle der Längsströmung	Nein	Ja

### Kosten der Massnahme

Für die Umsetzung der Massnahme M3 sind Investitionskosten von 13 Mio. CHF anzunehmen (hier: fiktiver Wert!). Die jährlichen Betriebskosten betragen 2% der Investitionskosten. Für die Risikoanalyse ist davon auszugehen, dass diese Kosten alle anfallenden Aufwände (direkte, indirekte) abdecken. Zur Bestimmung der Finanzierungskosten ist ein Zinssatz von 2% zu verwenden. Die Lebensdauer der Massnahme M3 beträgt 25 Jahre.

Abb. 9.37 Eingangswerte für die Kostenrechnung der Massnahme M3.

Eingangsrösse	Wert	Einheit	Bemerkung
Investitionskosten	13'000'000	CHF	(Projektstand 03.2014)
Betriebskosten	260'000	CHF/a	(Projektstand 03.2014)
Lebensdauer	25	Jahre	Gemäss SIA
Annuität	958'087	CHF/a	Gemäss Kap. 0

### Wirkung der Massnahme

Die Massnahme erhöht die Absaugmenge normengerecht und verbessert damit stark die Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelbenutzer im Brandfall. Obwohl der Dimensionierungsbrand lediglich 30 MW beträgt, muss vermerkt werden, dass eine Absaugmenge von 180 m<sup>3</sup>/s für die Entrauchung eines 40 bis 50 MW Brandes ausreichen würde. Zudem ist der positive Effekt in abgeschwächter Form auch bei grösseren Bränden vorhanden. Diese Massnahme wirkt auf der Ebene der Konsequenzen sowohl bei normalen Fahrzeugbränden als auch bei Gefahrgutbränden. Die Tunnellüftung hat keinen Einfluss auf die Ereignisse selbst.

Abb. 9.38 Wirkung der Massnahme M3 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen des allgemeinen Verkehrsgeschehens.

Ereignisse	
Unfälle	kein Effekt
Brände	kein Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	positiver Effekt (Verringerung)
Tote	positiver Effekt (Verringerung)

Abb. 9.39 Wirkung der Massnahme M3 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen bei Gefahrgutereignissen.

Ereignisse	
Explosion	kein Effekt
Toxischer Unfall	kein Effekt
Gefahrgutbrand	kein Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	positiver Effekt (Verringerung)
Tote	positiver Effekt (Verringerung)

Das Lüftungssystem nach Massnahme wird wie folgt eingestuft:

- natürliche Lüftung
- Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
- Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
- Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
- Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit 100%

## 9.4 H.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h

Im Ist-Zustand beträgt die signalisierte Geschwindigkeit 100 km/h. Bei dieser Massnahme soll geprüft werden, ob eine Senkung der Geschwindigkeit das Risiko effizient reduziert.

### Kosten der Massnahme

Die Kosten der Massnahme setzen sich aus den Kosten für Ausrüstung des Tunnels mit neuen Schildern und den gesellschaftlichen Kosten, die aus der reduzierten Geschwindigkeit resultieren:

$$M_k = 4.9 \text{ [km]} \left( \frac{1}{80 \text{ [km/h]}} - \frac{1}{100 \text{ [km/h]}} \right) \cdot 70'000 \text{ [Fzg/d]} \cdot 365 \text{ [d/a]} \cdot 21 \text{ [CHF/h]} = 6'572'738 \text{ CHF}$$

Die Kosten betragen bei der Verkehrsleistung im Ist-Zustand bei einer Verkehrsleistung von 70'000 Fzg/d in beide Richtungen total 6'575'299 CHF. Hierin sind die Kosten für Beschilderung mit 2% verzinst.

Abb. 9.40 Eingangswerte für die Kostenrechnung der Massnahme M4.

Eingangsgrösse	Wert	Einheit	Bemerkung
Investitionskosten	50'000	CHF	(Projektstand 03.2014) Änderung der Beschilderung
Lebensdauer	25	Jahre	Gemäss SIA 197/2 Anhang A Wechselsignale
Annuität Schilder	2'561	CHF/a	Gemäss Kap. 0
Kosten für verlängerte Fahrzeit	6'572'738	CHF/a	
Annuität Fahrzeit	6'572'738	CHF/a	
Annuität	6'575'299	CHF/a	

### Wirkung der Massnahme

Die Reduktion der Geschwindigkeit führt zu einer Reduktion der Unfälle und auch der Schwere der Unfälle in Bezug auf Todesfälle und Verletzte. Somit reduziert sie indirekt auch die Anzahl der Brände, die als Folge von Unfällen auftreten.

Abb. 9.41 Wirkung der Massnahme M4 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen des allgemeinen Verkehrsgeschehens.

Ereignisse	
Unfälle	Positiver Effekt
Brände	Indirekter Positiver Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	Positiver Effekt (Verringerung)
Tote	Positiver Effekt (Verringerung)

Auf Gefahrgutunfälle ist kein signifikanter Effekt zu erwarten, da die Geschwindigkeitsreduktion sich hauptsächlich auf den Individualverkehr auswirkt.

Abb. 9.42 Wirkung der Massnahme M4 auf die verschiedenen Szenarien und berücksichtigten Konsequenzen bei Gefahrgutereignissen.

Ereignisse	
Explosion	kein signifikanter Effekt
Toxischer Unfall	kein signifikanter Effekt
Gefahrgutbrand	kein signifikanter Effekt
Konsequenzen	
Verletzte	kein signifikanter Effekt
Tote	kein signifikanter Effekt

## 10 I. Risikoermittlung nach Massnahmen

Risiken werden für die folgenden Massnahmen und für Massnahmenkombinationen untersucht und diskutiert:

- **M1:** Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m;
- **M2:** Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen;
- **M3:** Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung;
- **M4:** Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h;
- **MK:** Massnahmenkombinationen.

### 10.1 H.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m

Die Ergebnisse der Berechnungen der Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m ist in Abb. 10.43 zusammengestellt. Die Massnahme beeinflusst die Konsequenzen markant, jedoch nicht die Eintretenshäufigkeit der Ereignisse. Die Todesfallrate kann insgesamt von 4.25 im Ist-Zustand auf 0.65 nach Umsetzung der Massnahme gesenkt werden. Die Anzahl Tote wird von 0.53 auf 0.08 pro Jahr reduziert.

Abb. 10.43 Massnahme M1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoermittlung.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.0113	0.779	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.0020	0.0061	0.0002
<b>Gesamt</b>	0.0818	6.505	4.051
<b>Verkehr</b>			
<b>Verkehr</b>	125.20		Mio. Fzg. km/Jahr
<b>Unfallrate</b>	0.026		1/Mio. Fzg. km
<b>Brandereignisrate</b>	6.123		1/Mrd. Fzg. km
<b>Todesfallrate</b>	0.653		1/Mrd. Fzg. km
<b>Verletztenrate</b>	0.052		1/Mio. Fzg. km

In Abb. 10.44 ist der Vergleich zwischen dem Ist-Zustand und dem Zustand nach Umsetzung der Massnahme M1 gegeben.

Abb. 10.44 Massnahme M1: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleich zum Ist-Zustand.

	Ist-Zustand	M1
	$M_{Ist}$	$M_{M1}$
Unfallrate [1/Mio Fzg. km]	0.026	0.026
Brandrate [1/Mrd Fzg. km]	6.123	6.123
Todesfallrate Total [1/Mrd Fzg. km]	4.246	0.653
Anzahl Unfälle pro Jahr	3.284	3.284
Anzahl Verletzte infolge Unfällen pro Jahr	5.719	5.719
Anzahl Tote infolge Unfällen pro Jahr	0.0684	0.0684
Anzahl Brände pro Jahr	0.767	0.767
Anzahl Verletzte infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	2.408	0.779
Anzahl Tote infolge Fzg.- Bränden pro Jahr	0.4602	0.0113
Anzahl Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0002	0.0002
Anzahl Verletzte infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0089	0.0061
Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0030	0.0020
Anzahl Todesfälle Total (inkl. Todesfalläquivalente)	0.7940	0.2915

Der Einfluss auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Gefahrgutereignisse ist in Abb. 10.45 und Abb. 10.46 für die beiden Richtungen dargestellt. Durch M1 wird das Gefahrgutrisiko nur minimal reduziert.

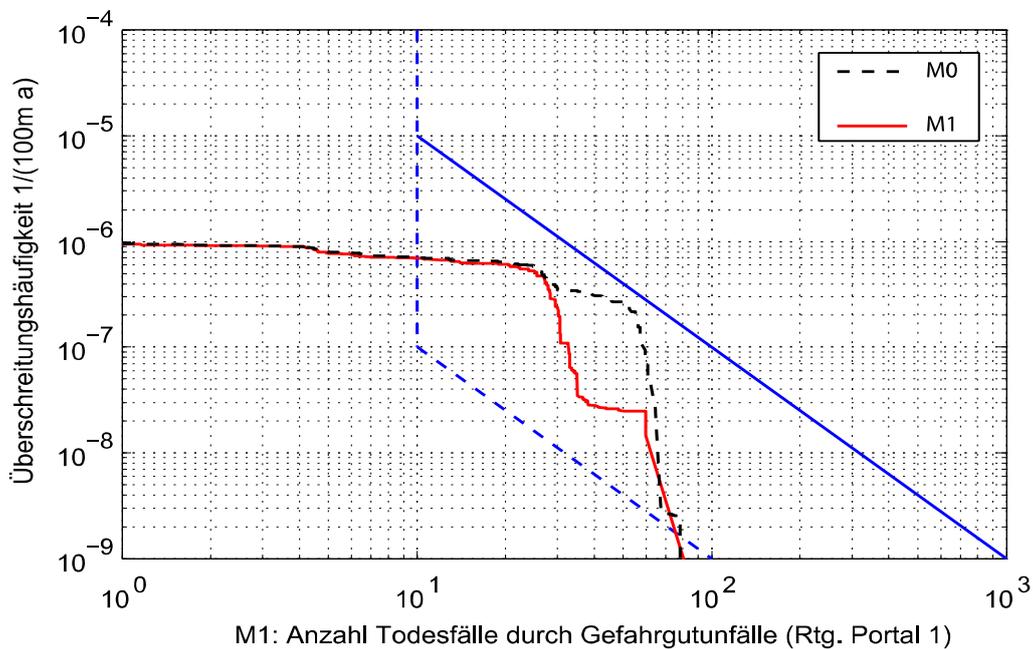


Abb. 10.45 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme M1.

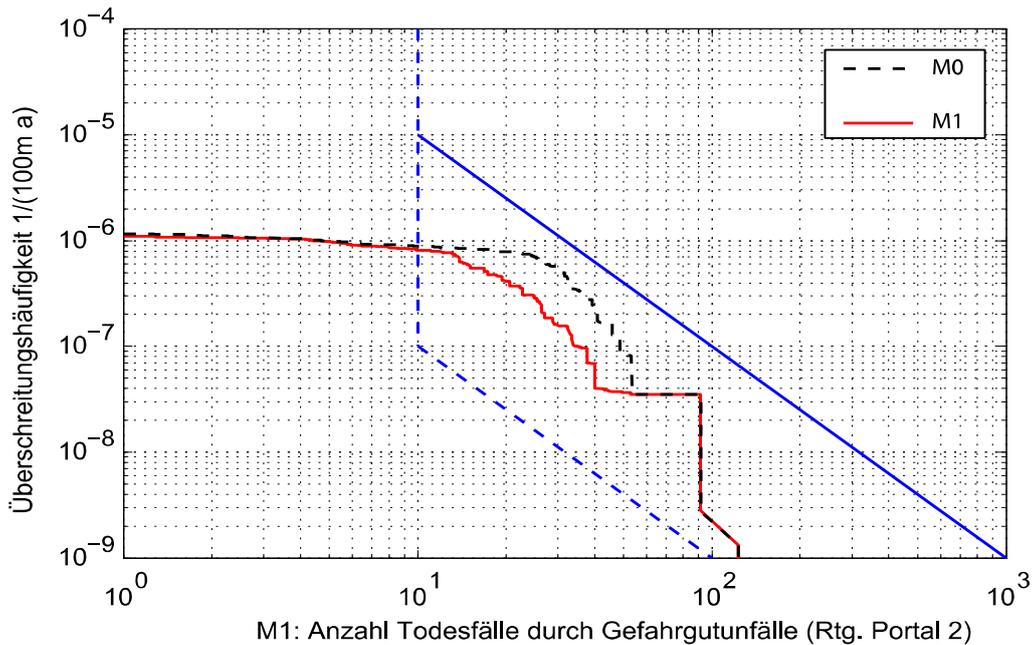


Abb. 10.46 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme M1.

## 10.2 H.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen

Die Ergebnisse der Berechnungen über den Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen ist in Abb. 10.47 zusammengestellt. Die Schlitzrinne hat insbesondere eine Wirkung auf die Lachenbrände. Da dieses Ereignis kaum einen Beitrag zum Gesamtrisiko hat, sind die Ergebnisse der Risikoanalyse fast identisch mit dem Ist-Zustand.

Abb. 10.47 Massnahme M2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoermittlung.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.4602	2.408	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.0023	0.0069	0.0002
<b>Gesamt</b>	0.5309	8.134	4.051
<hr/>			
<b>Verkehr</b>	125.20	Mio. Fzg. km/Jahr	
<b>Unfallrate</b>	0.026	1/Mio. Fzg. km	
<b>Brandereignisrate</b>	6.123	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Todesfallrate</b>	4.240	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Verletztenrate</b>	0.065	1/Mio. Fzg. km	

In Abb. 10.48 ist der Vergleich zwischen dem Ist-Zustand und dem Zustand nach Umsetzung der Massnahme M2 gegeben.

Abb. 10.48 Massnahme M2: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleich zum Ist-Zustand.

	Ist-Zustand	M2
	$M_{Ist}$	$M_{M2}$
Unfallrate [1/Mio Fzg. km]	0.026	0.026
Brandrate [1/Mrd Fzg. km]	6.123	6.123
Todesfallrate Total [1/Mrd Fzg. km]	4.246	4.240
Anzahl Unfälle pro Jahr	3.284	3.284
Anzahl Verletzte infolge Unfällen pro Jahr	5.719	5.719
Anzahl Tote infolge Unfällen pro Jahr	0.0684	0.0684
Anzahl Brände pro Jahr	0.767	0.767
Anzahl Verletzte infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	2.408	2.408
Anzahl Tote infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	0.4602	0.4602
Anzahl Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0002	0.0002
Anzahl Verletzte infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0089	0.0069
Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0030	0.0023
Anzahl Todesfälle Total (inkl. Todesfalläquivalente)	0.7940	0.7933

Der Einfluss auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Gefahrgutereignisse ist in Abb. 10.49 und Abb. 10.50 für die beiden Richtungen dargestellt. Durch M2 wird das Gefahrgutrisiko nur minimal reduziert.

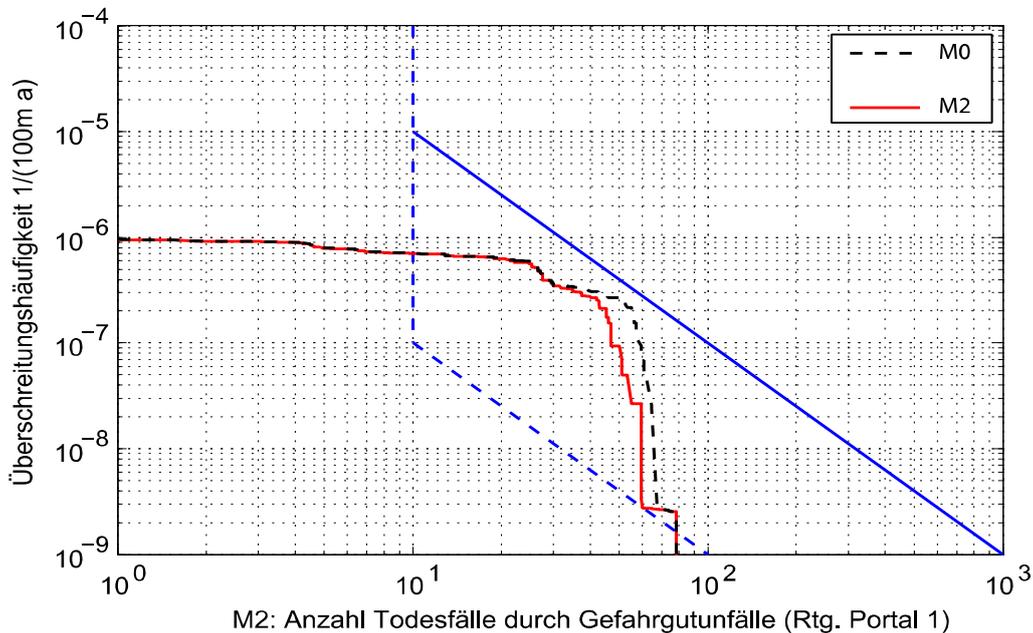


Abb. 10.49 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme M2.

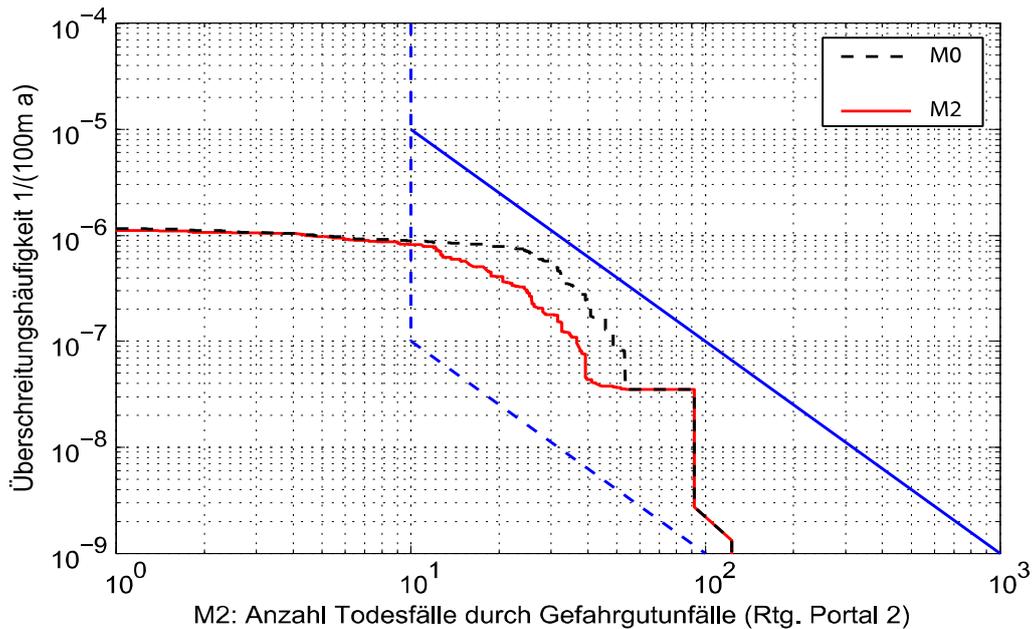


Abb. 10.50 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme M2.

### 10.3 H.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung

Die Ergebnisse der Berechnungen nach Einbau einer der derzeit gültigen Norm entsprechenden Lüftung ist in Abb. 10.51 zusammengestellt.

Diese Massnahme hat ebenfalls einen Einfluss auf die Konsequenzen infolge Tunnelbränden, Lachenbränden und auf die toxischen Gefahrgutunfälle.

Die Todesfallrate kann von 4.25 pro Mrd Fzg. km im Ist-Zustand auf 0.59 nach Umsetzung der Massnahme M3 reduziert werden. Die Anzahl Todesfälle reduzieren sich pro Jahr von 0.53 auf 0.07.

Abb. 10.51 Massnahme M3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoermittlung.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.0049	0.214	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.00077	0.0023	0.00018
<b>Gesamt</b>	0.0741	5.935	4.051
<hr/>			
<b>Verkehr</b>	125.20	Mio. Fzg. km/Jahr	
<b>Unfallrate</b>	0.026	1/Mio. Fzg. km	
<b>Brandereignisrate</b>	6.123	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Todesfallrate</b>	0.592	1/Mrd. Fzg. km	
<b>Verletztenrate</b>	0.0474	1/Mio. Fzg. km	

In Abb. 10.52 ist der Vergleich zwischen dem Ist-Zustand und dem Zustand nach Umsetzung der Massnahme M3 gegeben.

Abb. 10.52 Massnahme M3: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleich zum Ist-Zustand.

	Ist-Zustand	M3
	$M_{Ist}$	$M_{M3}$
Unfallrate [1/Mio Fzg. km]	0.026	0.026
Brandrate [1/Mrd Fzg. km]	6.123	6.123
Todesfallrate Total [1/Mrd Fzg. km]	4.246	0.592
Anzahl Unfälle pro Jahr	3.284	3.284
Anzahl Verletzte infolge Unfällen pro Jahr	5.719	5.719
Anzahl Tote infolge Unfällen pro Jahr	0.0684	0.0684
Anzahl Brände pro Jahr	0.767	0.767
Anzahl Verletzte infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	2.408	0.214
Anzahl Tote infolge Fzg.- Bränden pro Jahr	0.4602	0.0049
Anzahl Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0002	0.0002
Anzahl Verletzte infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0089	0.0023
Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0030	0.00077
Anzahl Todesfälle Total (inkl. Todesfalläquivalente)	0.7940	0.2655

Der Einfluss auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Gefahrgutereignisse ist in Abb. 10.53 und Abb. 10.54 für die beiden Richtungen dargestellt. Durch M3 wird das Gefahrgutrisiko sichtbar reduziert.

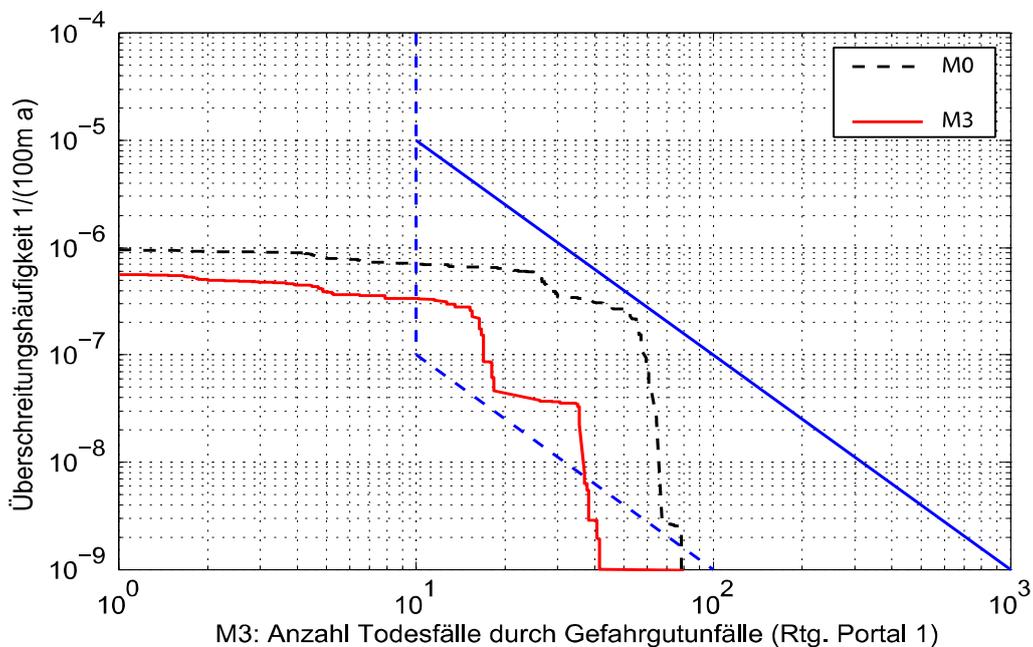


Abb. 10.53 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme M3.

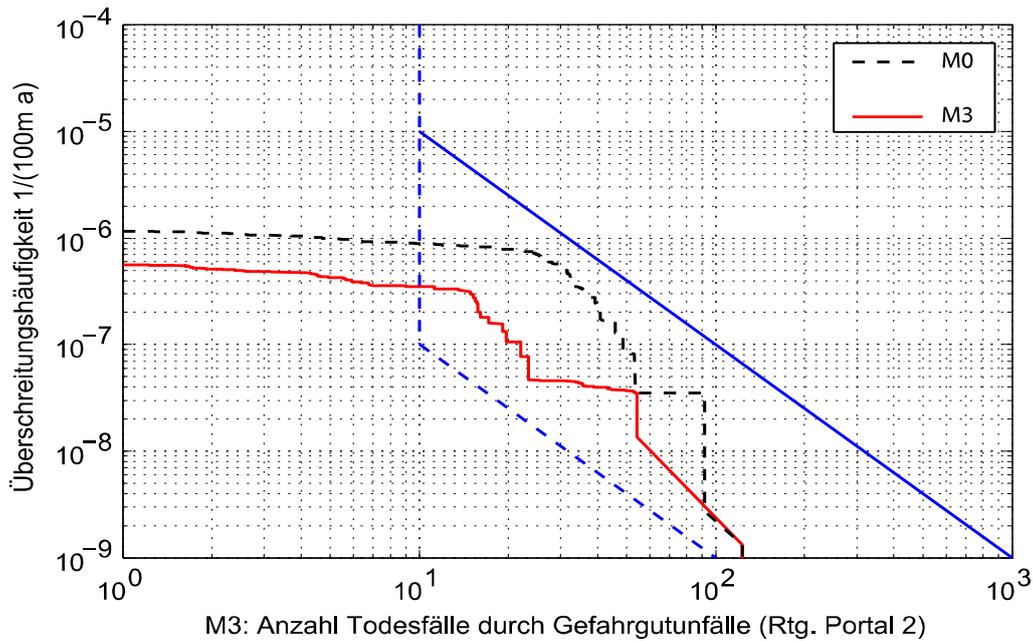


Abb. 10.54 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme M3.

## 10.4 H.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h

Eine Reduktion der Geschwindigkeit auf 80 km/h reduziert die Anzahl Unfälle und somit auch den Teil der Tunnelbrände, die aus Unfällen resultieren. In Abb. 10.55 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse nach Umsetzung der Massnahme dargestellt.

Die gesamte Todesfallrate verringert sich auf 3.93 Tote pro Mrd. Fzg. km und die Gesamtanzahl Tote auf 0.49 Tote pro Jahr.

Ein Vergleich der Ergebnisse nach Umsetzung der Massnahme mit dem Ist-Zustand ist in Abb. 10.56 gegeben.

Abb. 10.55 Massnahme M4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoermittlung.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0251	3.257	2.068
<b>Brände</b>	0.4640	2.434	0.717
<b>Gefahrgut</b>	0.00343	0.0103	0.00018
<b>Gesamt</b>	0.4925	5.702	2.785
<hr/>			
<b>Verkehr</b>	125.20		Mio. Fzg. km/Jahr
<b>Unfallrate</b>	0.017		1/Mio. Fzg. km
<b>Brandereignisrate</b>	5.728		1/Mrd. Fzg. km
<b>Todesfallrate</b>	3.934		1/Mrd. Fzg. km
<b>Verletztenrate</b>	0.0455		1/Mio. Fzg. km

Abb. 10.56 Massnahme M4: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleich zum Ist-Zustand.

	Ist-Zustand	M4
	$M_{Ist}$	$M_{M4}$
Unfallrate [1/Mio Fzg. km]	0.026	0.017
Brandrate [1/Mrd Fzg. km]	6.123	5.728
Todesfallrate Total [1/Mrd Fzg. km]	4.246	3.934
Anzahl Unfälle pro Jahr	3.284	2.066
Anzahl Verletzte infolge Unfällen pro Jahr	5.719	3.257
Anzahl Tote infolge Unfällen pro Jahr	0.0684	0.0251
Anzahl Brände pro Jahr	0.767	0.717
Anzahl Verletzte infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	2.408	2.434
Anzahl Tote infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	0.4602	0.4640
Anzahl Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0002	0.0002
Anzahl Verletzte infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0089	0.0103
Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0030	0.0034
Anzahl Todesfälle Total (inkl. Todesfalläquivalente)	0.7940	0.6765

Der Einfluss auf die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Gefahrgutereignisse ist in Abb. 10.57 und Abb. 10.58 für die beiden Richtungen dargestellt. Durch M4 wird das Gefahrgutrisiko leicht erhöht. Dies ist der Fall, da durch die geringere Fahrgeschwindigkeit mehr Personen im Tunnel sind. Die Reduktion der Geschwindigkeit auf die Häufigkeit von Gefahrgutunfällen ist nicht modelliert.

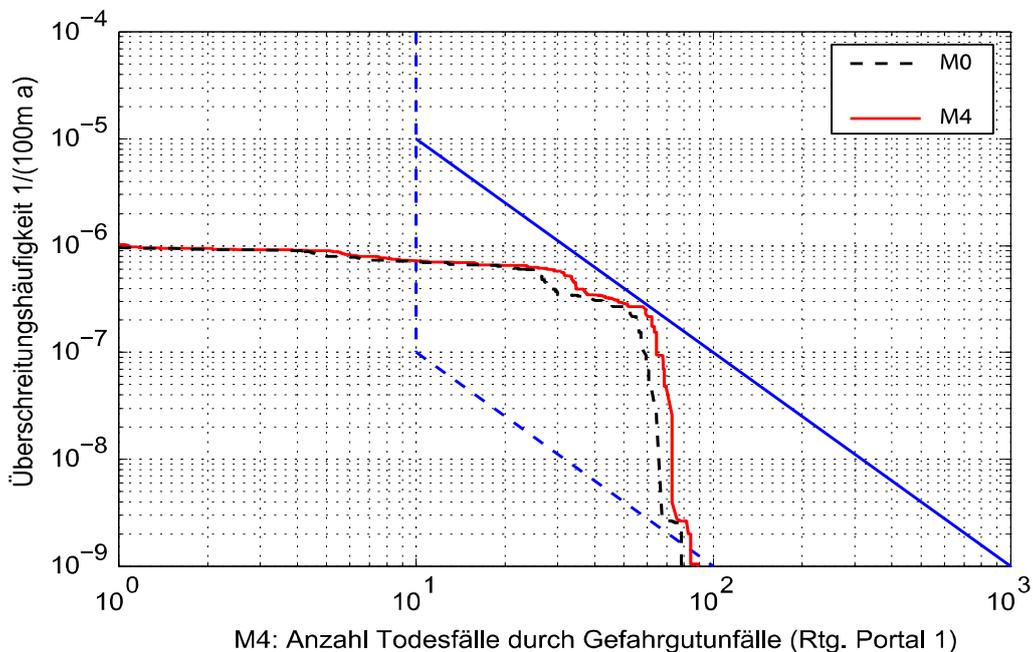


Abb. 10.57 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme M4.

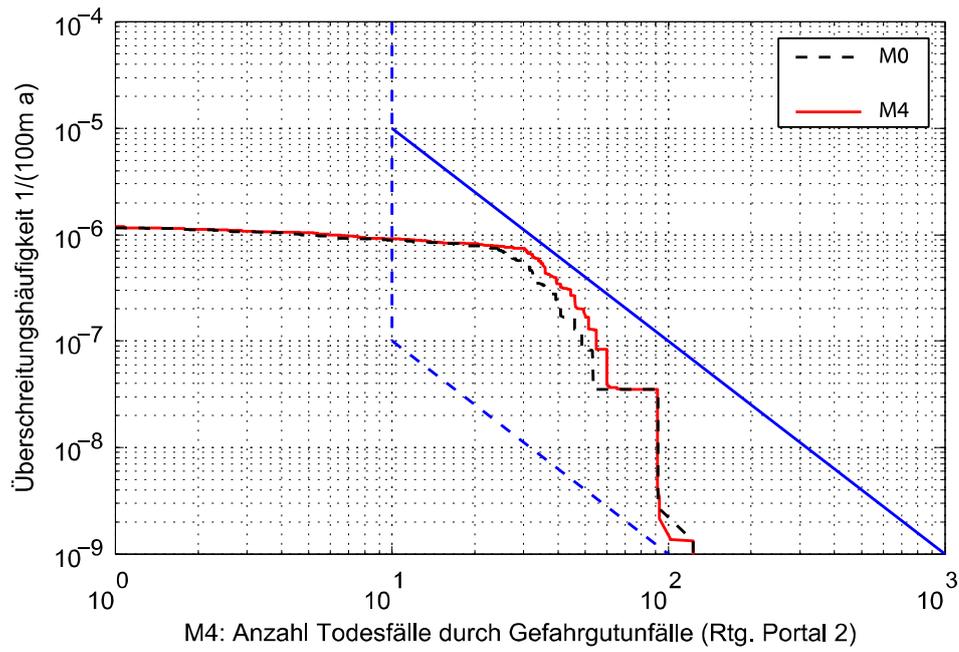


Abb. 10.58 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme M4.

## 11 J. Risikobewertung

### 11.1 J.1 Massnahmennutzenrechnung $M_{NU}$ der Einzelmassnahmen

**Wichtige Vorbemerkung die Grenzkosten betreffend:**

Im folgenden Beispiel wurde für die Grenzkosten der Wert von 5'000'000.- CHF angewendet.

Für die Umsetzung der Methodik in den Projekten muss der vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE empfohlene Wert angewendet werden (*Value of statistical life (VOSL): empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz*).

#### 11.1.1 J.1.1 Verringerung der Abstände der Notausgänge auf 300 m

Abb. 11.59 Massnahmennutzenrechnung für die Verringerung der Abstände der Notausgänge.

	Wert [1/a]	Bemerkung
Todesfälle vor Massnahme	0.5316	(M0)
Todesfälle nach Massnahme	0.0817	(M1)
$\Delta$ Todesfälle	0.4499	$\Delta T$
Verletzte vor Massnahme	8.1359	(M0)
Verletzte nach Massnahme	6.5041	(M1)
$\Delta$ Verletzte	1.6318	$\Delta V$
$M_{Nu}$ [CHF]	2'512'693	Beispiel: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot 5'000'000$ CHF Projekte: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot VOSL$ ARE [CHF]

#### 11.1.2 J.1.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinne

Abb. 11.60 Massnahmennutzenrechnung bei Einbau einer Schlitzrinne.

	Wert [1/a]	Bemerkung
Todesfälle vor Massnahme	0.5316	(M0)
Todesfälle nach Massnahme	0.5309	(M2)
$\Delta$ Todesfälle	0.0007	$\Delta T$
Verletzte vor Massnahme	8.1359	(M0)
Verletzte nach Massnahme	8.1339	(M2)
$\Delta$ Verletzte	0.002	$\Delta V$
$M_{Nu}$ [CHF]	3'822	Beispiel: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot 5'000'000$ CHF Projekte: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot VOSL$ ARE [CHF]

### 11.1.3 J.1.3 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung

Abb. 11.61 Massnahmennutzenrechnung bei Einbau einer normenkonformen Lüftung.

	Wert [1/a]	Bemerkung
Todesfälle vor Massnahme	0.5316	(M0)
Todesfälle nach Massnahme	0.0741	(M3)
$\Delta$ Todesfälle	0.4575	$\Delta T$
Verletzte vor Massnahme	8.1359	(M0)
Verletzte nach Massnahme	5.935	(M3)
$\Delta$ Verletzte	2.200	$\Delta V$
$M_{Nu}$ [CHF]	2'642'585	Beispiel: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot 5'000'000$ CHF Projekte: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot VOSL ARE$ [CHF]

### 11.1.4 J.1.4 Reduktion der Geschwindigkeit im Tunnel von 100 auf 80 km/h

Abb. 11.62 Massnahmennutzenrechnung durch Reduktion der Geschwindigkeit.

	Wert [1/a]	Bemerkung
Todesfälle vor Massnahme	0.5316	(M0)
Todesfälle nach Massnahme	0.4925	(M4)
$\Delta$ Todesfälle	0.0391	$\Delta T$
Verletzte vor Massnahme	8.1359	(M0)
Verletzte nach Massnahme	5.7013	(M4)
$\Delta$ Verletzte	2.4346	$\Delta V$
$M_{Nu}$ [CHF]	588'177	Beispiel: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot 5'000'000$ CHF Projekte: $(\Delta T + \Delta V/31) \cdot VOSL ARE$ [CHF]

## 11.2 J.3 Massnahmenkostenrechnung $M_{Ko}$

### 11.2.1 J.3.1 Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m

Abb. 11.63 Massnahmenkostenrechnung für die Verringerung der Abstände der Notausgänge.

Kosten	Einheit	Wert	Bemerkung/Quelle
Unterhaltskosten	[CHF/a]	0	
Investitionskosten	[CHF]	5'000'000	
Zinssatz	[%]	2	ASTRA 89005
Teuerung	[%]	1	
Lebensdauer	[a]	25	SIA 197/2 Anhang A
A	[-]	0.0318	ASTRA 89005
T	[-]	1.263	ASTRA 89005
<b><math>M_{Ko}</math></b>	<b>[CHF/a]</b>	<b>159'116</b>	

### 11.2.2 J.3.2 Einbau einer der Norm entsprechenden Entwässerung mit Schlitzrinnen

Abb. 11.64 Massnahmenkostenrechnung für den Einbau von Schlitzrinnen.

Kosten	Einheit	Wert	Bemerkung/Quelle
Unterhaltskosten	[CHF/a]	0	
Investitionskosten	[CHF]	10'000'000	
Zinssatz	[%]	2	ASTRA 89005
Teuerung	[%]	1	
Lebensdauer	[a]	80	SIA 197/2 Anhang A
A	[-]	0.0252	ASTRA 89005
T	[-]	1.4431	ASTRA 89005
<b><math>M_{Ko}</math></b>	<b>[CHF/a]</b>	<b>251'607</b>	

### 11.2.3 J.3.4 Einbau einer der Norm entsprechenden Tunnellüftung

Abb. 11.65 °Massnahmenkostenrechnung für den Einbau einer normenkonformen Lüftung.

Kosten	Einheit	Wert	Bemerkung/Quelle
Unterhaltskosten	[CHF/a]	260'000	
Investitionskosten	[CHF]	13'000'000	
Zinssatz	[%]	2	ASTRA 89005
Teuerung	[%]	1	
Lebensdauer	[a]	25	SIA 197/2 Anhang A
A	[-]	0.0512	ASTRA 89005
T	[-]	1.124	ASTRA 89005
<b>M<sub>Ko</sub></b>	<b>[CHF/a]</b>	<b>958'087</b>	

### 11.2.4 J.3.5 Reduktion der Geschwindigkeit von 100km/h auf 80km/h

Abb. 11.66 Massnahmenkostenrechnung für die Reduktion der Geschwindigkeit.

Kosten	Einheit	Wert	Bemerkung/Quelle
Zeitkosten	[CHF/a]	6'572'738	ASTRA 89005
Investitionskosten	[CHF]	50'000	
Zinssatz	[%]	2	ASTRA 89005
Teuerung	[%]	1	ASTRA 89005
Lebensdauer	[a]	25	SIA 197/2 Anhang A
A	[-]	0.0512	ASTRA 89005
T	[-]	1.124	ASTRA 89005
<b>M<sub>Ko</sub></b>	<b>[CHF/a]</b>	<b>6'575'299</b>	

### 11.3 J.4. Massnahmeneffizienz $M_{EFF}$

Die Massnahmeneffizienz,  $M_{EFF}$ , wird im ersten Schritt als der Verhältniswert von Massnahmenkosten zu Massnahmennutzen berechnet (Abb. 11.67).

Massnahmennutzenrechnungen  $M_{NU}$  der Einzelmassnahmen werden im Abschnitt 11.1 berechnet. Die Massnahmenkostenrechnungen  $M_{KO}$  werden im Abschnitt 0 berechnet.

Abb. 11.67 Massnahmeneffizienz für die Einzelmassnahmen.

	M1	M2	M3	M4
Massnahmennutzenrechnung $M_{NU}$	2'512'693	3'822	2'642'585	588'177
Massnahmenkostenrechnung $M_{KO}$	159'116	251'607	958'087	6'575'299
Massnahmeneffizienz, $M_{EFF}$ .	15.79	0.015	2.76	0.089
Empfohlene Massnahme	Ja	Nein	Ja	Nein

Abb. 11.68 zeigt eine graphische Darstellung der Ergebnisse. Es ist direkt erkennbar, dass Massnahme M2 und M4 nicht effizient sind und im Rahmen dieser Studie keiner weiteren Betrachtung mehr bedürfen.

Die Massnahme M2 kann jedoch aus Aspekten der Risikoreduktion von Gefahrgütern weiterhin sinnvoll sein. Dies ist jedoch getrennt nach ASTRA 19002 zu beurteilen. Eventuell ist jedoch nach Umsetzung der effizienten Massnahmen das Risiko bereits soweit reduziert, dass keine weitere Massnahme mehr erfolgen muss.

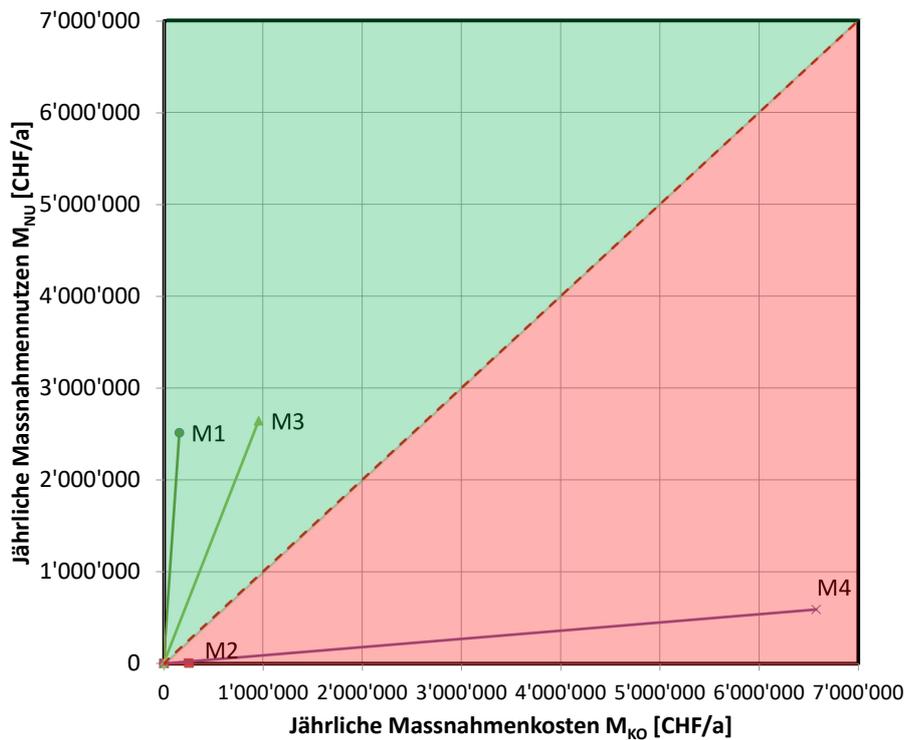


Abb. 11.68 Bewertung der Einzelmassnahmen.

Die Massnahmen mit Massnahmeneffizienz grösser als 1 (M1 und M3) werden im Folgenden schrittweise kombiniert.

## 11.4 J.5. Bewertung von den Massnahmenkombinationen, Akzeptanz

Die beiden Massnahmen M1 und M3 können kombiniert werden. Sie sind nicht unabhängig voneinander und die Ergebnisse können daher nicht direkt summiert werden. Eine Neuberechnung des Risikos ist in diesem Fall erforderlich.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoberechnung ist in Abb. 11.69 gegeben. Ein Vergleich mit dem Ist-Zustand gibt Abb. 11.70.

Abb. 11.69 Massnahmenkombination MK (M1+M3): Zusammenfassung der Ergebnisse der Risikoermittlung.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.00012	0.123	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.00071	0.0021	0.00018
<b>Gesamt</b>	0.0692	5.844	4.051
<b>Verkehr</b>			
	125.20		Mio. Fzg. km/Jahr
<b>Unfallrate</b>	0.026		1/Mio. Fzg. km
<b>Brandereignisrate</b>	6.123		1/Mrd. Fzg. km
<b>Todesfallrate</b>	0.553		1/Mrd. Fzg. km
<b>Verletztenrate</b>	0.0467		1/Mio. Fzg. km

Abb. 11.70 Massnahmenkombination MK (M1+M3): Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleich zum Ist-Zustand.

	Ist-Zustand	MK
	M <sub>Ist</sub>	M <sub>MK</sub>
Unfallrate [1/Mio Fzg. km]	0.026	0.026
Brandrate [1/Mrd Fzg. km]	6.123	6.123
Todesfallrate Total [1/Mrd Fzg. km]	4.246	0.553
Anzahl Unfälle pro Jahr	3.284	3.284
Anzahl Verletzte infolge Unfällen pro Jahr	5.719	5.719
Anzahl Tote infolge Unfällen pro Jahr	0.0684	0.0684
Anzahl Brände pro Jahr	0.767	0.767
Anzahl Verletzte infolge Fzg.-Bränden pro Jahr	2.408	0.123
Anzahl Tote infolge Fzg.- Bränden pro Jahr	0.4602	0.00012
Anzahl Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0002	0.0002
Anzahl Verletzte infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0089	0.0021
Anzahl Tote infolge Gefahrgutereignisse pro Jahr	0.0030	0.0007
Anzahl Todesfälle Total (inkl. Todesfalläquivalente)	0.7940	0.2577

Abb. 11.71 Massnahmennutzenrechnung für die Verringerung der Abstände der Notausgänge bei Einbau einer normenkonformen Lüftung (M1+M3).

	Wert [1/a]	Bemerkung
Todesfälle vor Massnahme	0.5316	(M0)
Todesfälle nach Massnahme	0.0706	(MK: M1+M3)
$\Delta$ Todesfälle	0.4510	$\Delta T$
Verletzte vor Massnahme	8.1359	(M0)
Verletzte nach Massnahme	5.8427	(MK: M1+M3)
$\Delta$ Verletzte	2.2932	$\Delta V$
$M_{Nu}$ [CHF]	2'674'771	Beispiel: $(\Delta T + \Delta V/31)*5'000'000$ CHF Projekte: $(\Delta T + \Delta V/31)*VOSL ARE$ [CHF]

Die Massnahmenkosten pro Jahr ergeben sich aus der Summation der Kosten für die Einzelmassnahmen = 159'116 CHF/a + 958'087 CHF/a = 1'117'203 CHF/a.

Für die Analyse der Massnahmenkombination wird ausgehend von M1, welches die effizienteste Massnahme ist, zusätzlich Massnahme M3 bewertet. Aus Abb. 11.72 ist ersichtlich, dass die Kombination der beiden Massnahmen nicht effizient ist. Sie wird nicht zur Umsetzung empfohlen, da die Massnahmenkombination M1-M3 unterhalb der rot gestrichelten Linie liegt.

(Anmerkung: In diesem Beispiel wurde die Gesamtmassnahme M1 geprüft. In der Praxis kann es sinnvoll sein, die Analyse für jeden zusätzlichen Notausgang getrennt durchzuführen und so die effizienteste Anzahl an Notausgängen zu ermitteln).

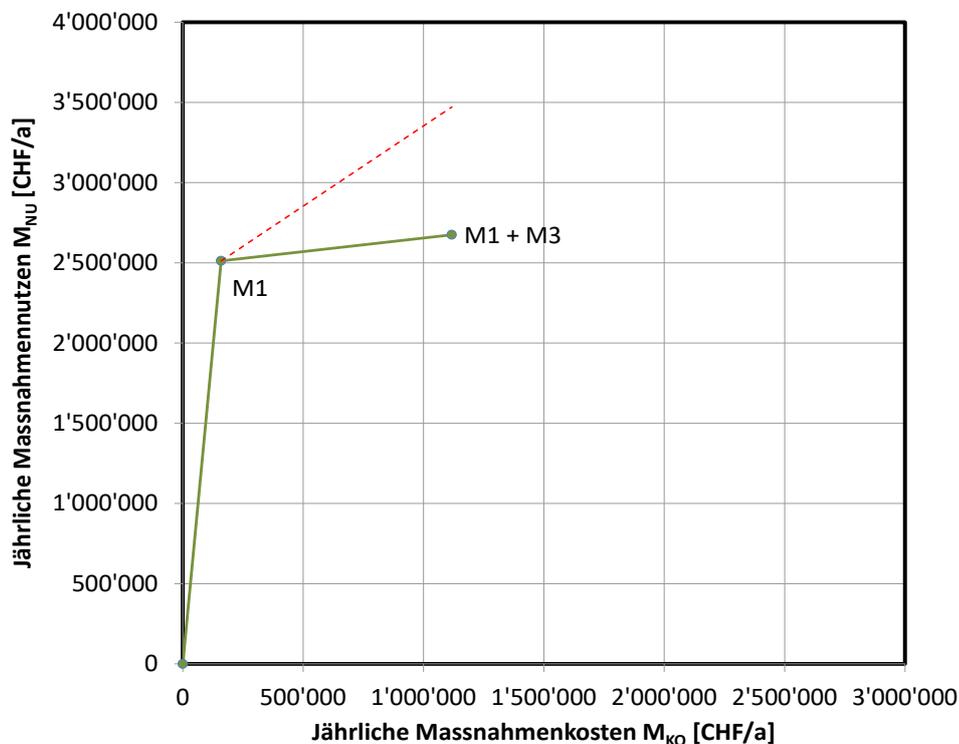


Abb. 11.72 Bewertung der Massnahmenkombination.

Abschliessend wird festgestellt, ob das ALARP Prinzip erfüllt ist und die Risiken nach Umsetzung aller möglichen effizienten Massnahmen und Massnahmenkombinationen unterhalb des Grenzwertes GII liegen.

Abb. 11.73 zeigt, dass die Todesfallrate im Ist-Zustand für den Tunnel im ALARP Bereich liegt. Nach Umsetzung der Massnahme M1 kann die Todesfallrate auf 0.65 Tote pro Mrd. Fzg. km gesenkt werden.

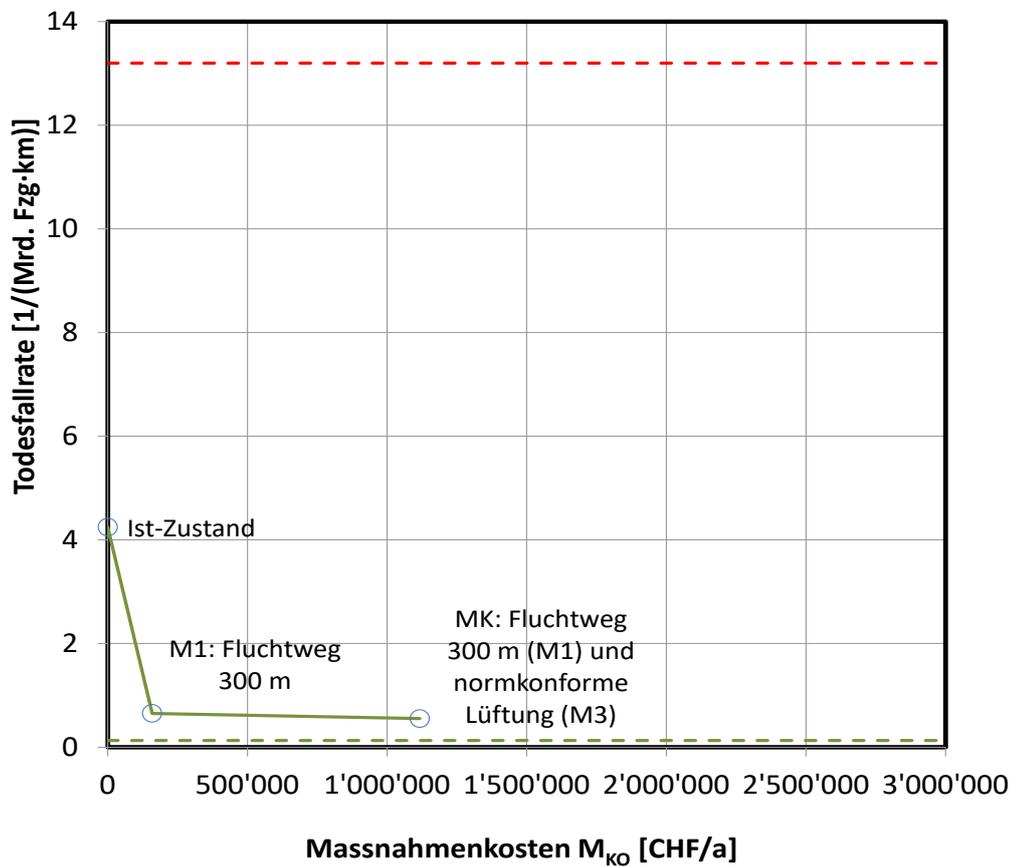


Abb. 11.73 Graphische Darstellung der Risikosituation vor und nach Durchführung der Massnahmen.

## 12 K. Handlungsempfehlungen

### 12.1 K.1. Tabellarische Zusammenfassung

<b>Inhalt</b> - Tabellarische Zusammenfassung der berechneten Werte		
Massnahme	Empfohlen	Kosten CHF
Verringerung der Fluchwegdistanz von 600 auf 300 m (8 zusätzliche Notausgänge)	Ja	5'000'000
Einbau von durchgehenden Schlitzrinnen	Nein	-
Einbau von Abluftklappen alle 100 m sowie Längslüftung mit Strahlventilatoren, Rauchdetektion, etc.	Nein	
Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 80 km/h	Nein	-
Gesamtkosten der empfohlenen Massnahme/ Massnahmenkombination		<b>5'000'000</b>

Abb. 12.74 Ergebnisse der Risikoermittlung nach Umsetzung der empfohlenen Massnahme/ Massnahmenkombination.

	Anzahl Todesfälle pro Jahr	Anzahl Verletzte pro Jahr	Anzahl Ereignisse pro Jahr
<b>Unfälle</b>	0.0684	5.719	3.284
<b>Brände</b>	0.0113	0.779	0.767
<b>Gefahrgut</b>	0.0020	0.0061	0.0002
<b>Gesamt</b>	0.0818	6.505	4.051
<b>Verkehr</b>			
	125.20		Mio. Fzg. km/Jahr
<b>Unfallrate</b>	0.026		1/Mio. Fzg. km
<b>Brandereignisrate</b>	6.123		1/Mrd. Fzg. km
<b>Todesfallrate</b>	0.653		1/Mrd. Fzg. km
<b>Verletztenrate</b>	0.052		1/Mio. Fzg. km

## 12.2 K.2. Graphische Darstellung

Inhalt	
-	Graphische Darstellung der Ermittlung der empfohlenen Massnahme/ Massnahmenkombination
-	Graphische Darstellung der Situation nach Umsetzung der Handlungsempfehlungen

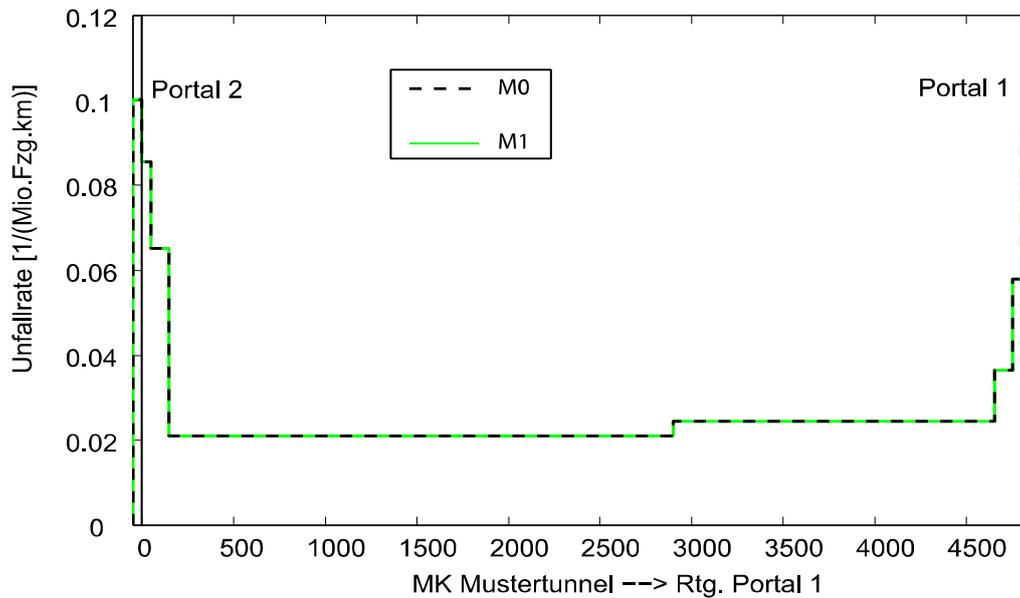


Abb. 12.75 Variation der Unfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

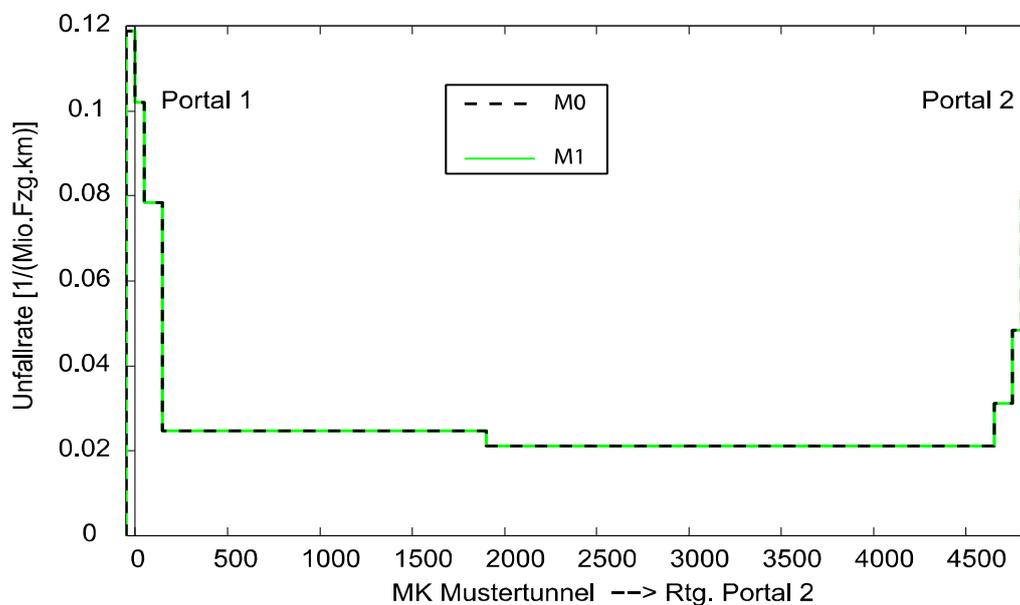


Abb. 12.76 Variation der Unfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

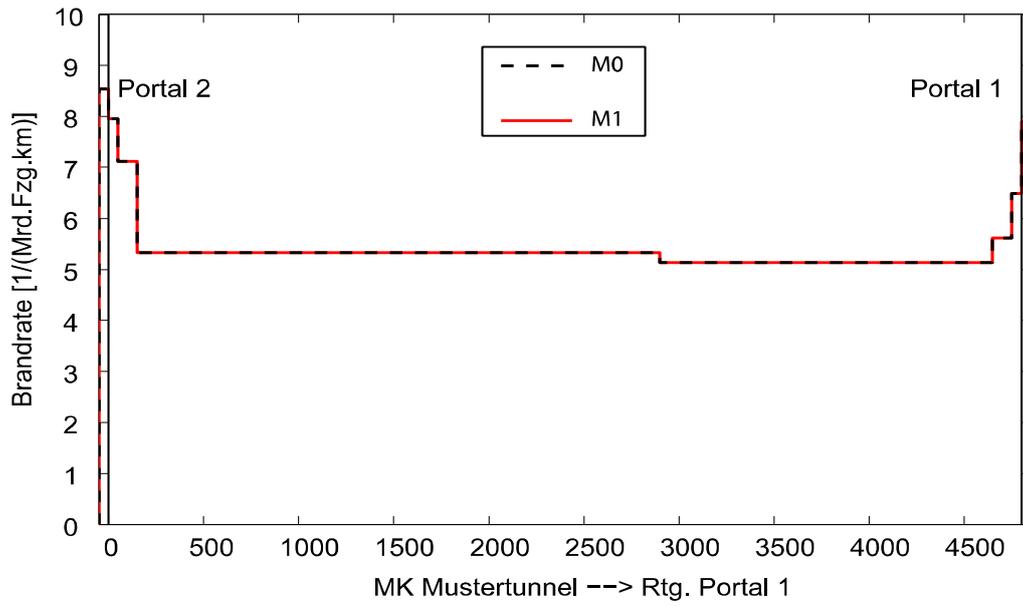


Abb. 12.77 Variation der Brandrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

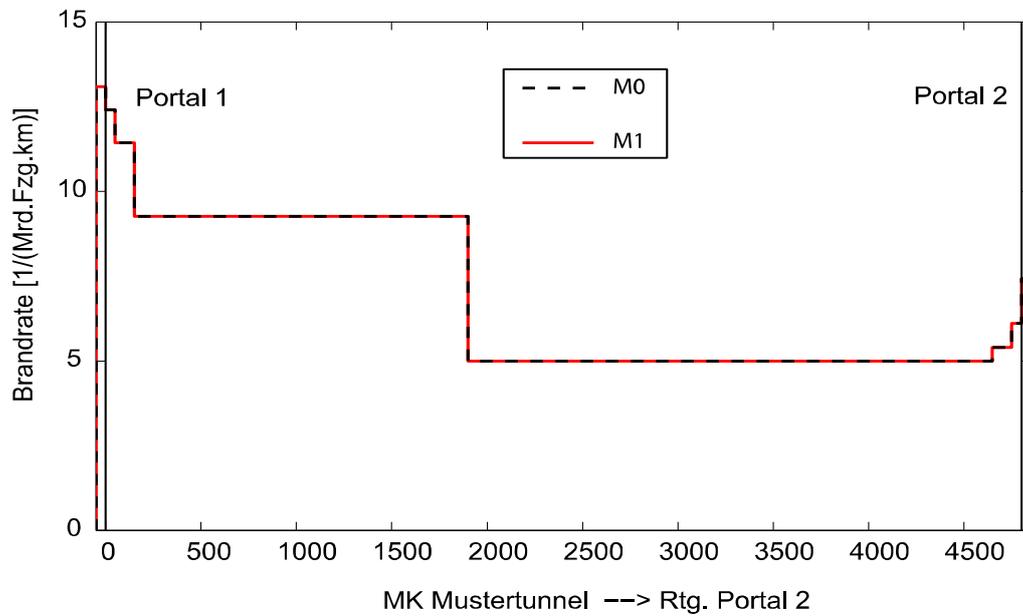


Abb. 12.78 Variation der Brandrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

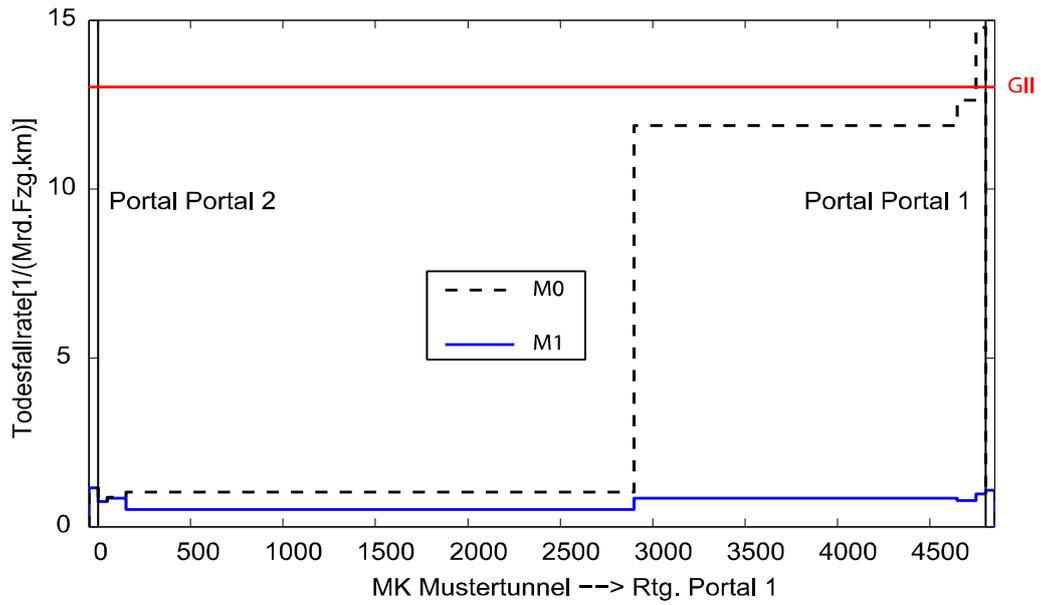


Abb. 12.79 Variation der Todesfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

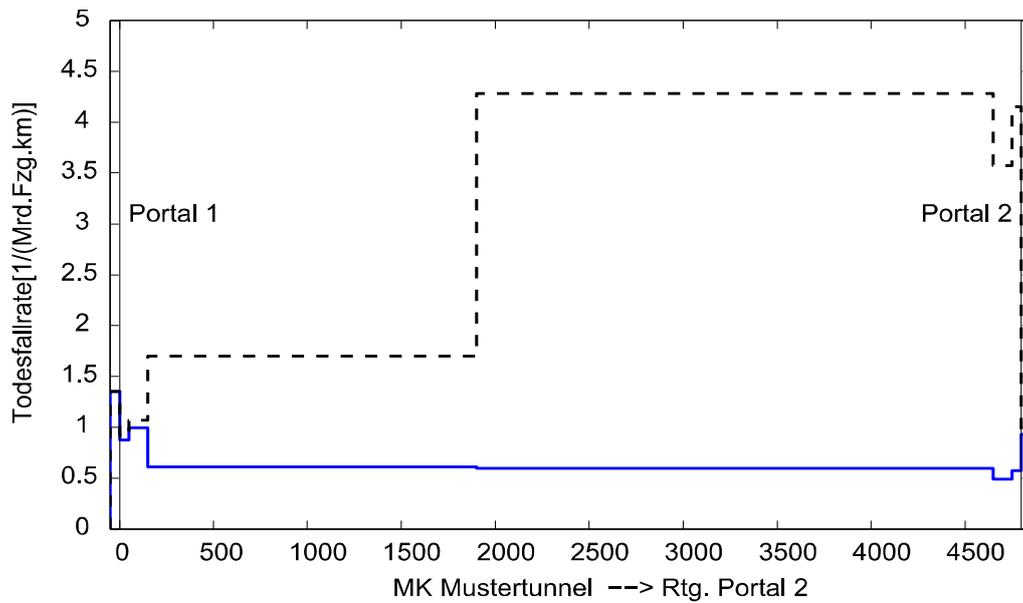


Abb. 12.80 Variation der Todesfallrate über die Tunnellänge in Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

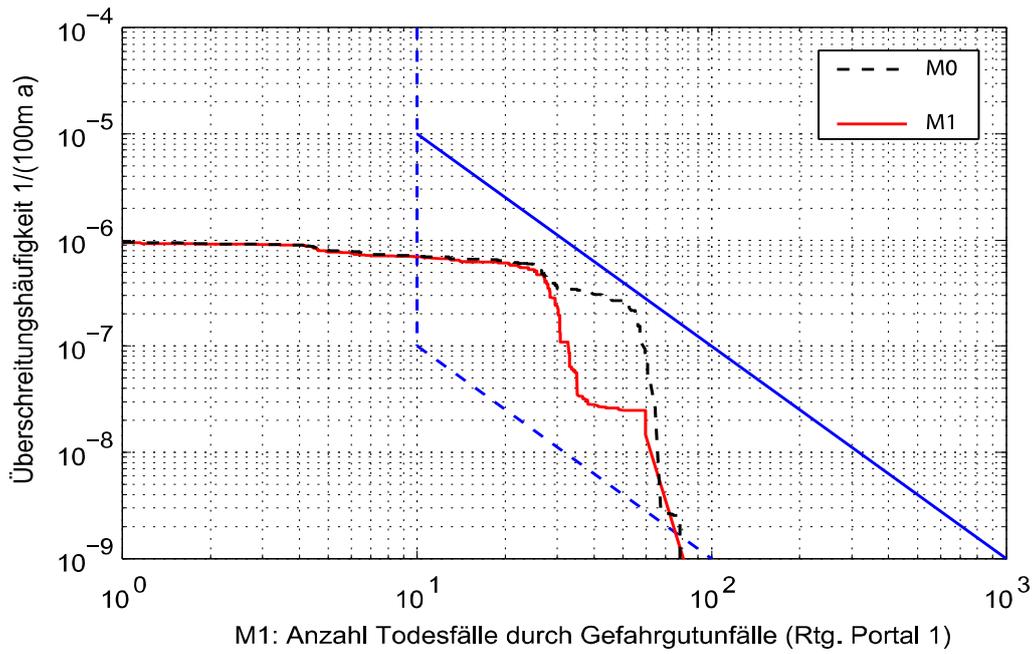


Abb. 12.81 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 1 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

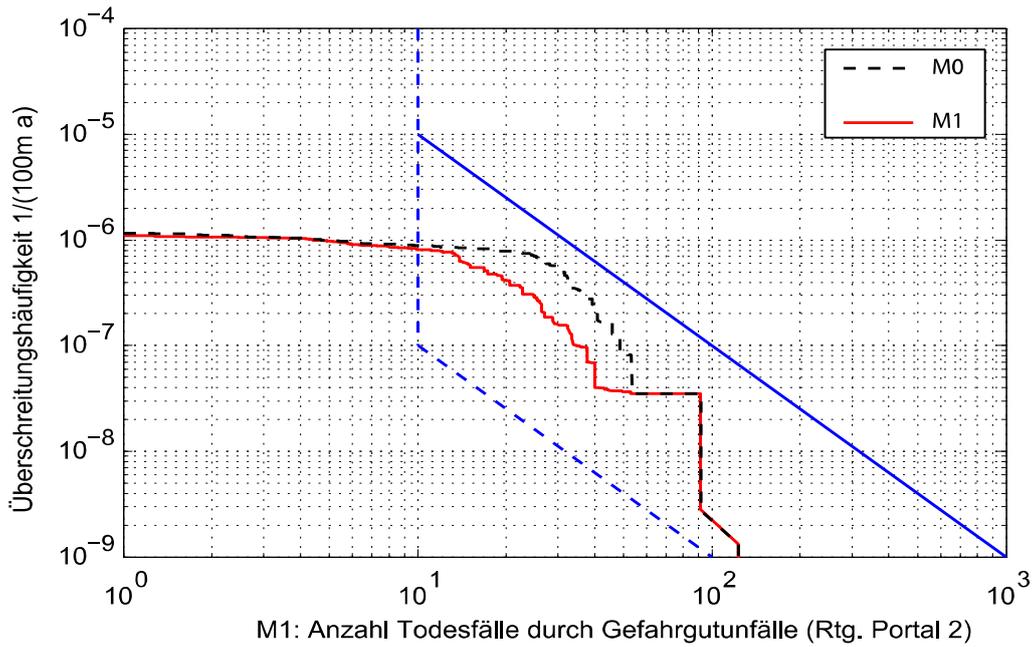


Abb. 12.82 Überschreitungshäufigkeit der Anzahl an Todesfällen pro 100 m und Jahr im Mustertunnel Richtung Portal 2 nach Umsetzung der Massnahme/ Massnahmenkombination.

## 12.3 K.3 Variantenwahl

### Inhalt

- Zusammenfassung der Variantenwahl

Aufgrund der Beurteilung der Kosteneffizienz wird die folgende Massnahme/ Massnahmenkombination empfohlen:

- Verringerung der Fluchtwegdistanz auf 300 m.

Die Massnahme bedeutet, dass 8 neue Notausgänge gebaut werden müssen – (inkl. der dazu gehörigen Elemente: Signalisierung, Beleuchtung, etc.). Die Kostenschätzung auf Stufe MK beträgt 5 Mio. CHF.

Diese Massnahme/ Massnahmenkombination ist kosteneffizient und muss nach der Richtlinie ASTRA 19004 und nach der Methodik ASTRA 89005 (und dem ALARP-Prinzip) umgesetzt werden.

Die übrigen identifizierten und analysierten Massnahmen sind nicht kosteneffizient.

## Literaturverzeichnis

### Abkommen

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1999), „**Abkommen vom 21. Juni 1999 zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Europäischen Gemeinschaft über den Güter- und Personenverkehr auf Schiene und Strasse**“, SR 0.740.72, [www.admin.ch](http://www.admin.ch).

### Weisungen des ASTRA

- [2] Bundesamt für Strassen ASTRA (2010), „**Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassen-netz**“, Weisung ASTRA 74001, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).

### Richtlinien des ASTRA

- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014) „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 19004, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008) „**Lüftung der Strassentunnel**“, Richtlinie ASTRA 13001, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [5] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008) „**Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13002, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [6] Bundesamt für Strassen ASTRA (2002) „**Normalprofile, Rastplätze und Raststätten der Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 11001, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [7] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012) „**Umsetzung der Störfallverordnung auf den Nationalstrassen**“, Richtlinie ASTRA 19002, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008) „**Verkehrsmanagement in der Schweiz**“, Richtlinie ASTRA 15003, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012) „**Videoanlagen**“, Richtlinie ASTRA 13005, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [10] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011) „**Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln**“, Richtlinie ASTRA 13010, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012) „**Dynamische Wegweisung (DWW)**“, Richtlinie ASTRA 15012, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).

### Normen

- [12] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel - Strassentunnel**“, Norm SIA 197/2.
- [13] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2001) „**Beleuchtung in Strassentunneln, -galerien und -unterführungen**“, SN 640 551-1.

### Dokumentationen des ASTRA

- [14] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014) „**Risikokzept für Tunnel der Nationalstrassen - Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken in Tunneln**“, ASTRA Dokumentation 89005, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [15] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011) „**Gefahrguttransport in Strassentunneln – Analyse und Beurteilung der Personenrisiken**“, ASTRA Dokumentation 84002, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).



## Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2014	1.20	15.02.2019	Anpassung der Grenzkosten.
2014	1.10	01.09.2015	Aktualisierung der Berechnungsergebnisse.
2014	1.00	13.10.2014	Publikation der deutschen Version.

