



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

RISIKOKONZEPT FÜR TUNNEL DER NATIONALSTRASSEN

*Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken
in Tunnel*

Ausgabe 2014 V1.10

ASTRA 89005

Impressum

Autor(en) / Arbeitsgruppe

Gammeter Christian	ASTRA, N-SFS
Gogniat Bernard	ASTRA, N-SFS
Jeanneret Alain	ASTRA, N-SFS
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 N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch herunter geladen werden.

© ASTRA 2014

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

Vorwort

Die vorliegende Dokumentation ASTRA 89005 „Risikokonzept für Tunnel der Nationalstrassen“, ergänzt die Richtlinie ASTRA 19004 „Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen“.

Die Dokumentation erläutert transparent die allgemeine Methode und das Vorgehen bei Risikoanalysen in Strassentunneln. Sie enthält Hintergründe und stellt die konkrete Anwendung der Methodik, inklusive der zu verwendenden Modelle vollständig dar. Sie dient den Anwendern zum allgemeinen Verständnis der Methode und als allgemeines Nachschlagewerk bei spezifischen Problemstellungen.

Die Dokumentation wurde von der im Impressum genannten Arbeitsgruppe, unter Leitung des ASTRA und unter Mitarbeit von Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft konzipiert und geschrieben. Die Begleitgruppe zu dieser Dokumentation hat massgeblich an der Methodik mitgewirkt und die Dokumentation mitgestaltet. Für die ausgezeichnete und aktive Mitarbeit sei an dieser Stelle allen Beteiligten herzlich gedankt.

Bundesamt für Strassen

Rudolf Dieterle, Dr. sc. techn.
Direktor

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage.....	7
1.2 Geltungsbereich	7
1.3 Übersicht der relevanten ASTRA Standards	7
1.4 Übersicht der verwendeten Grundlagen	7
1.5 Adressat und Anwendungsbereich	9
2 Methodologie	10
2.1 Anforderungen.....	10
2.2 Ziele.....	11
2.3 Bestehende Ansätze	11
2.4 Risikokzept	13
2.5 System	15
2.6 Risikobeurteilung.....	15
2.7 Risikoermittlung.....	15
2.7.1 Detaillierungsgrad der Risikobeurteilung	18
2.7.2 Modellierung der Indikatoren.....	20
2.7.3 Modellierung der Ereignisse.....	20
2.7.4 Modellierung der Konsequenzen	20
2.7.5 Risikoermittlung, Unsicherheiten und Abhängigkeiten	21
2.7.6 Aggregation von Risiken	21
2.8 Risikobewertung.....	21
2.8.1 Effizienz von Massnahmen	21
2.8.2 Risikoakzeptanz	22
2.9 Ablauf einer Risikobewertung	22
3 System	25
3.1 Systemdefinition und Systemabgrenzung.....	25
3.1.1 Abgrenzung des Bauwerktyps	25
3.1.2 Räumliche Abgrenzung.....	25
3.1.3 Zeitliche Abgrenzung	27
3.1.4 Ist-Zustand	27
3.1.5 Zustand nach Massnahmen.....	27
3.2 Systemrepräsentation	28
3.2.1 Indikatoren.....	28
3.2.2 Länge des Tunnels.....	31
3.2.3 Zonen	31
3.2.4 Homogene Segmente	32
3.2.5 Tunnelkomponenten	33
3.2.6 Tunnelgeometrie	36
3.3 Gefahren	38
3.3.1 Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen.....	38
3.3.2 Gefahrgutereignisse.....	39
4 Risikoermittlung	41
4.1 Allgemeines	41
4.2 Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen.....	41
4.2.1 Risikoermittlung mit Bayes'schen Netzen.....	41
4.2.2 Unfallrelativzahlen, Unfallmodifikationsfaktoren UMF, Brandmodifikationsfaktoren BMF und Hintergrundraten U_R in Tunneln	46
4.2.3 Modellierung der Indikatoren.....	53

4.2.4	Modellierung der Ereignisse.....	85
4.2.5	Modellierung der Konsequenzen	106
4.3	Gefahrgutereignisse	108
4.3.1	Risikoermittlung der Gefahrgutereignisse mit Bayes'schem Netz	108
4.3.2	Modellierung der Indikatoren.....	111
4.3.3	Modellierung der Ereignisse.....	114
4.3.4	Modellierung der Konsequenzen	120
4.4	Aggregation der Risiken	123
5	Risikobewertung	124
5.1	Einleitung.....	124
5.2	Risikoreduzierende Massnahmen und Massnahmenkombinationen	124
5.3	Massnahmennutzenrechnung M_{NU}	124
5.3.1	Vermeidung von Todesfällen	125
5.3.2	Vermeidung von Verletzten.....	125
5.3.3	Massnahmengesamtnutzen	125
5.4	Massnahmenkostenrechnung M_{KO}	126
5.4.1	Investitionskosten M_{Inv} , Unterhaltskosten M_U und Lebensdauern n	128
5.4.2	Zinssätze	129
5.4.3	Teuerungsindex	129
5.5	Massnahmeneffizienz M_{Eff}	130
5.6	Risikoakzeptanzkriterien	130
5.6.1	ALARP Prinzip.....	130
5.6.2	Individuelle und kollektive Personenrisiken	137
5.6.3	Grenzkosten MRS	138
5.6.4	Akzeptanzkriterien in der Störfallverordnung als Randbedingung.....	138
5.6.5	Tolerierbares Risiko und Massnahmenakzeptanz M_{Akt}	139
5.7	Bewertung von Massnahmen und Massnahmenkombinationen	139
6	Darstellung der Risikobeurteilung	145
6.1	Allgemeines	145
6.2	Graphische Darstellungen.....	145
6.3	Tabellarische Zusammenfassung	145
6.4	Risikobericht.....	145
	Anhänge	146
	Glossar	173
	Literaturverzeichnis	174
	Auflistung der Änderungen.....	179

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Ziel des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) ist, das Risiko für Tunnelbenutzer mit den zur Verfügung stehenden Mitteln bestmöglich zu reduzieren und ein einheitlich hohes Sicherheitsniveau für Tunnelbenutzer zu erreichen.

Hierbei stellt sich insbesondere für bestehende Strassentunnel die Frage, welche Massnahmen und damit verbunden auch welche Investitionen das Sicherheitsniveau signifikant steigern können. Risikobasierte Konzepte können helfen, diese Frage zu beantworten. Nicht zuletzt wird daher auch gemäss der Richtlinie 2004/54/EC des Europäischen Parlaments gefordert, dass alle Mitgliedstaaten auf nationaler Ebene über eine präzise, genau definierte und der optimalen Praxis entsprechenden Methodik zur Risikobewertung in Strassentunneln verfügen. Durch die bilateralen Verträge mit der EU gilt diese Forderung auch für die Schweiz.

Die vorliegende Dokumentation zeigt die schweizerische Methodik zum Vorgehen bei der risikobasierten Entscheidungsfindung zur Bewertung von Massnahmen zur Erhöhung der Sicherheit in Tunneln der Nationalstrassen.

1.2 Geltungsbereich

Diese Methodik gilt für alle bestehenden und zu erstellenden Tunnel des Nationalstrassennetzes gemäss der Definition in der Richtlinie ASTRA 19004, die eine Länge von mehr als 300 m haben.

Sie gilt auch für Bauvorhaben, die die Kantone in Rahmen der Fertigstellung des beschlossenen Nationalstrassennetzes erstellen.

In Einhausungen und in Galerien herrschen teilweise tunnelähnliche Zustände, die mit der vorliegenden Methodik beurteilt werden können, wenn die Anforderungen gemäss Kap. 3 erfüllt sind.

In spezifischen Fragestellungen in Bezug auf den Langsamverkehr kann die hier definierte Methodik zur Risikoermittlung und -bewertung verwendet werden. Es müssen für die Risikoermittlung des Langsamverkehrs spezifische Analysen angefertigt werden.

Gleiches gilt auch für weitere, in Spezialfällen als relevant eingeschätzte Indikatoren, die nicht explizit bereits in der Methodik berücksichtigt sind.

1.3 Übersicht der relevanten ASTRA Standards

Die relevanten ASTRA Standards sind in der Richtlinie ASTRA 19004 zusammengestellt.

1.4 Übersicht der verwendeten Grundlagen

In [12] ist eine Übersicht der wesentlichen Grundlagen dieser Dokumentation dargestellt. Neben diesen Grundlagen sind alle verwendeten Dokumente im Literaturverzeichnis angegeben.

Die wesentlichen Grundlagen:

- Die Norm SIA 197 enthält die Grundlagen, die bei der Projektierung von Verkehrstunneln zu beachten sind, ungeachtet der Zweckbestimmung.
- Die Norm SIA 197/2 ergänzt die Norm SIA 197 und enthält Besonderheiten, die beim Strassentunnel zu berücksichtigen sind.
- Im ASTRA Bericht 1351 ist eine Beste Praxis Methode für die Risikoermittlung in Strassentunneln dargestellt. Sie behandelt Risiken für den Verkehrsteilnehmer während der Nutzung des Strassentunnels.
- Im ASTRA Bericht 618 wurden Empfehlungen entwickelt, welche ermöglichen sollen, Risiken aus unterschiedlichen Sicherheitsbereichen mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden zu vergleichen und zu aggregieren.
- ASTRA Bericht 622 legt die rechtlichen Aspekte des risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts dar. Es wird geschlussfolgert, dass das Strafrecht einem risikobasierten und effizienten Mitteleinsatz nichts im Wege steht und es wird gefordert, in Normen und Richtlinien risikobasierte Ansätze zu verfolgen.
- Im OECD/PIARC Report Transport of Dangerous Goods through road tunnels werden quantitative Modelle zur Risikoermittlung infolge von Gefahrguttransporten in Strassentunneln beschrieben.

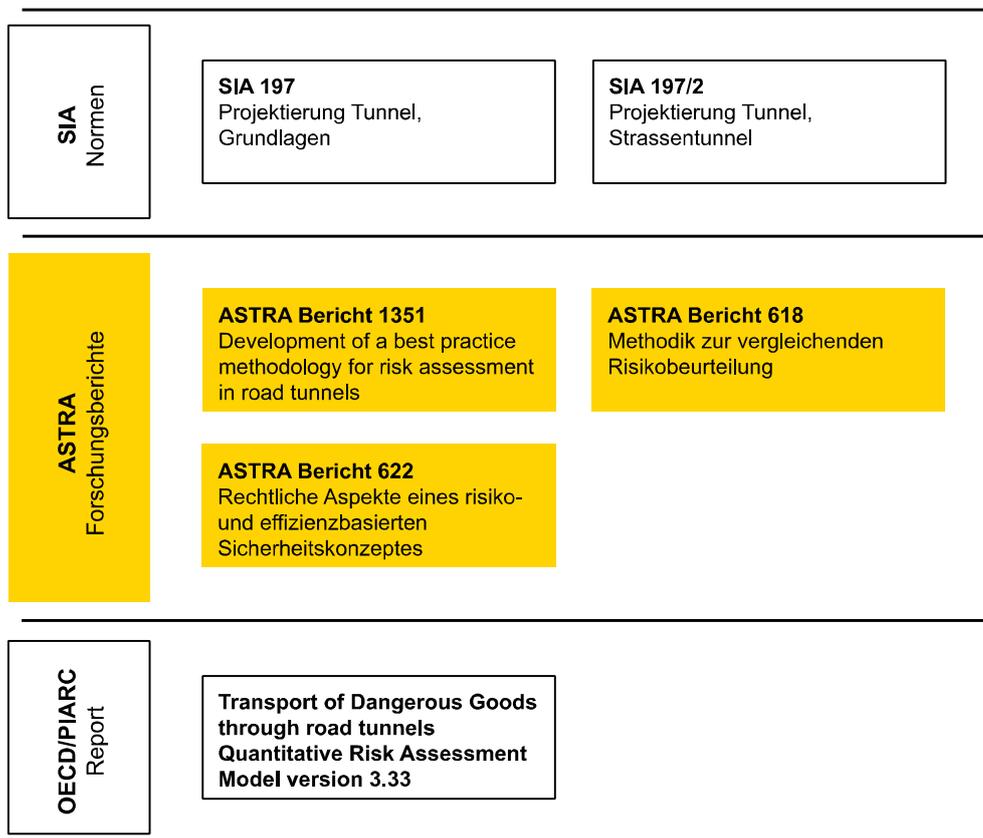


Abb. 1.1 Übersicht über die wesentlichen Grundlagen der Dokumentation.

1.5 Adressat und Anwendungsbereich

Die Dokumentation richtet sich vor allem:

- an die Vollzugsstellen der Projektgenerierung, der Projektierung und Realisierung und des Betriebs und des betrieblichen Unterhalts des ASTRA,
- an Bauherren und
- Anwender, die mit dem Vollzug beauftragt werden (z.B. Ingenieure, Experten).

2 Methodologie

2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an die Methodik leiten sich aus den typischen Fragestellungen des ASTRA ab, d.h. auf operativer Ebene sollte die Sicherheit von Tunneln auf rationaler Grundlage überprüft bzw. verbessert werden können. Auf strategischer Ebene sollte eine Priorisierung von Massnahmen und eine optimale Budgetverteilung für ein Portfolio von Tunneln ermöglicht werden, und der Einfluss von systematischen Änderungen im Tunnelportfolio auf die Sicherheit sollte untersucht werden können. Hieraus lassen sich die folgenden generellen Anforderungen an die Methodik ableiten:

- **Konformität**
Die Methodik sollte konform zur aktuellen „Besten Praxis“ in den Bereichen „Risikoermittlung“ und „Verkehrssicherheit“ sein. Bestehende Gesetze, Normen und Richtlinien müssen als notwendige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.
- **Erweiterbarkeit**
In die Methodik sollen Informationen, die aus Daten gewonnen werden können, sowie Wissen aus dem Tunnelbetrieb integriert werden können. Neue Informationen sollten bei konkreten Fragestellungen sowie auch für Weiterentwicklungen der Methodik integriert werden können. Zudem müssen Aktualisierungen der Datengrundlage der Modelle einfach durchgeführt werden können.
- **Umsetzbarkeit**
Die Methodik muss mit angemessenem Aufwand umgesetzt werden können.
- **Detaillierung**
Die Methodik muss ausreichend detailliert sein, um die Entscheidungsoptionen zur Risikoreduktion, welche sich aus den oben aufgeführten charakteristischen Problemstellungen ergeben, zu untersuchen. Dies beinhaltet die Berücksichtigung von Gefahrgutrisiken und verschiedenen Betriebszuständen sowie alle für das Risiko relevanten Verkehrs- und Tunnelcharakteristiken und Massnahmen. Gleichzeitig sollten sehr grobe Untersuchungen auf strategischer Ebene möglich sein.
- **Vergleichbarkeit**
Ergebnisse von Risikobeurteilungen sollen vergleichbar und reproduzierbar sein.
- **Transparenz**
Die Ergebnisse der Methodik sollen gut nachvollzogen und transparent kommuniziert werden können.

Aus diesen generellen Anforderungen ergeben sich eine Reihe spezifischer Anforderungen an die Methodik, wobei spezifische Anforderungen auf drei verschiedenen Ebenen definiert werden:

- **Ebene Risikobeurteilung (prinzipiell):**
Aspekte der Systemdefinition, Modellierung der Konsequenzen, Berücksichtigung von Unsicherheiten, Aggregation von Risiken, Massnahmeneffizienz, Risikobewertung und Darstellung von Risiken werden gemäss den Empfehlungen des Forschungsprojekts AGB1 [28] in der Methodik berücksichtigt. Hierdurch wird ein Grossteil der oben aufgeführten generellen Anforderungen abgedeckt.

- **Ebene Ereignismodellierung:**

Kernelement jeder Methodik ist die Modellierung von Konsequenzen (Unfälle, Brände, Gefahrgutereignisse, Todesfälle, etc.) in Abhängigkeit von den Charakteristiken des Systems (Tunnelanlage, Strassenanlage, Verkehr). Wesentlich ist, dass in der Methodik alle sicherheitsrelevanten Charakteristiken berücksichtigt werden, auf die der Entscheidungsträger durch Massnahmen Einfluss nehmen kann.

- **Ebene Modellierungsinstrumente:**

Im Bereich der Risikomodellierung existiert eine Vielzahl von Modellierungsinstrumenten, die prinzipiell alle für Risikobetrachtungen an Strassentunneln geeignet sind. Mit den verwendeten Modellierungsinstrumenten sollten sich auch komplexe Problemstellungen konsistent und übersichtlich behandeln lassen. Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Einflussgrössen sollten berücksichtigt werden können, und die Methodik sollte einfach umsetzbar sein und reproduzierbare Ergebnisse liefern. In der vorliegenden Methodik werden Bayes'sche Netze als Modellierungsinstrument verwendet (Anhang III).

Die vorliegende Methodik fokussiert nicht nur auf die Ereignismodellierung, d.h. auf die Darstellung von Ereignisraten (z.B. Unfall- und/oder Todesfallraten) als Funktion von Tunnel- und Verkehrscharakteristiken, sondern bettet diesen wesentlichen Bestandteil in den gesamten Entscheidungsprozess ein.

2.2 Ziele

Mit der Erarbeitung der Methodik soll sich ein risikobasierter, einheitlicher Ansatz zur Beurteilung der Risiken von Tunneln der Nationalstrassen sowie zur Einleitung von kostenwirksamen Massnahmen etablieren. Für die Methodik gelten die nachfolgenden Grundsätze und Zielsetzungen:

- Die Methodik für die Risikoermittlung von Tunneln der Nationalstrassen entspricht der aktuellen Besten Praxis.
- Die Methodik kann auf bestehende als auch auf neue Tunnel in der Planung- und Projektierungsphase angewendet werden und kann auch komplexe Situationen beurteilen.
- Sie ist auf alle Strassentunnel, die im Verantwortungsbereich des ASTRA liegen und eine Länge vom mehr als 300 m haben, anwendbar.
- Sie ermöglicht eine einheitliche Umsetzung und Anwendung durch die zuständigen Stellen. Für die Entscheidungsfindung auf strategischer Ebene ist die Methodik auch vereinfacht anwendbar.
- Die Methodik ist für die Gesamtrisiken (Summe der Risiken aus Gefahrgutszenarien und Szenarien ohne Beteiligung von Gefahrgut) ausgearbeitet und kann aber auch die zugrunde gelegten Gefährdungsbilder separat ausweisen.
- Die Methodik ist transparent und nachvollziehbar.
- Die Methodik basiert auf definierten Parametern und Kriterien, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten und um Entscheide gegenüber Dritten darlegen und begründen zu können.
- Als Systemgrenzen stehen die Risiken des Tunnels (von Portal bis Portal) im Vordergrund.

2.3 Bestehende Ansätze

In PIARC [29], Safe-T [31] und der ITA-COSUF-Benchmarkstudie [32] wird eine Übersicht über bestehende Methoden und Methodiken für Risikobewertungen in Strassentunneln geboten. Sowohl qualitative als auch quantitative Verfahren werden zu Risikobewertungen von Strassentunneln verwendet.

Entsprechend dem Vorgehen bei einer Risikobeurteilung gemäss [28] sind die Methodikbausteine nach den drei Hauptbereichen Risikoermittlung, Risikobewertung und Massnahmenplanung aufgeführt:

- **Risikoermittlung**
Die bestehenden Methodikbausteine decken eine grosse Spannweite zwischen qualitativen Methoden und Methodiken mit intuitivem Ansatz bis hin zu quantitativen, analytischen Ansätzen, die auf physikalischen Modellen aufbauen, ab.
- **Risikobewertung**
Die bestehenden Methoden und Methodiken können das Risiko insgesamt qualitativ beurteilen oder können Systeme oder Szenarien bewerten.
- **Massnahmenplanung**
Bestehenden Methoden und Methodiken im Bereich der Massnahmenplanung sind eng verknüpft mit der angewendeten Bewertungsansatzmethodik. Sie können allgemeine Überlegungen, Bewertung von Risikoindikatoren oder Kosten-Nutzen Beurteilungen beinhalten.

Die meisten bestehenden Methoden sind allgemeine Risikoanalyse-Werkzeuge und keine spezifischen Risikoanalysemethoden für Strassentunnel.

Die Unterschiede in den bestehenden Methoden reichen von grundlegend unterschiedlichen Risikomethoden bis hin zu Unterschieden in der betrachteten Risikoart, wie beispielsweise Risiken durch Gefahrgutunfälle und Risiken infolge von Verkehrsunfällen. Auch die Anzahl der berücksichtigten Parameter variiert bei den bestehenden Methoden stark.

Im Projekt ASTRA 2009/001 [33] wurden die Erkenntnisse und anwenderspezifischen Bedingungen verwendet, um eine Besten Praxis Methodik zur Risikoermittlung in Strassentunneln zu erarbeiten.

Zeitgleich wurde die ASTRA-Dokumentation „Gefahrguttransport in Strassentunneln, Analyse und Beurteilung der Personenrisiken“ [24] geschrieben. Dort wurde eine Methodik entwickelt, die eine einheitliche Umsetzung der Forderung gemäss ADR 2007 ermöglicht und gleichzeitig auch die Anforderungen der StFV berücksichtigt.

Im Projekt ASTRA 2005/102 [28] wurden Vorgaben entwickelt, welche die methodische Basis für Risikobetrachtungen über die verschiedenen Sicherheitsbereiche des ASTRA bilden. Die Einhaltung dieser Vorgaben soll die Vergleichbarkeit der Risiken über verschiedene Sicherheitsbereiche hinweg garantieren, die Entscheidungsfindung unterstützen und verbessern und damit eine effiziente und gesellschaftlich akzeptierbare Verteilung der Ressourcen ermöglichen.

Die vorliegende Methodik integriert die bestehenden Methoden und Methodiken und ergänzt diese bezüglich der spezifischen Anforderungen der Nationalstrassen und des ASTRA. Die Methodik soll sicherstellen, dass bei der Beurteilung, Bewertung, bei der Massnahmenplanung und beim Management der Strassentunnel ein einheitliches, begründbares und nachvollziehbares Verfahren angewendet wird.

Sie besteht aus semiquantitativen Elementen, mit denen der Bedarf einer Risikoanalyse bestimmt wird (siehe [12]) und quantitativen Elementen, die in Kapitel 4 und 5 beschrieben sind.

Weiterhin gelten verschiedene Vorgaben aus Normen und Richtlinien für die Planung und für die Ausstattung von Strassentunneln sowie Vorgaben aus der Störfallverordnung.

Die Hierarchie der verschiedenen Dokumente innerhalb des ASTRA ist in [26] geregelt.

2.4 Risikokzept

Zentrales Element ist ein entsprechender prozeduraler Aufbau des Risikobeurteilungskonzepts bestehend aus Systemdefinition/-abgrenzung, Risikoermittlung und Risikobewertung gemäss der Erkenntnissen aus [28], welches in Abb. 2.1 dargestellt ist. Dieses Konzept gilt übergeordnet.

Das allgemeine Konzept wird in den Kapiteln 2.5 - 2.8 in Bezug auf die vorliegende Problemstellung konkretisiert und angepasst. Des Weiteren werden die Hauptanforderungen an die prozeduralen Hauptelemente im Folgenden zusammengefasst vorgegeben. Kapitel 2.9 zeigt die konkrete Umsetzung und den Ablauf der Risikoanalyse.

In den Kapiteln 3, 4 und 5 werden detailliert die Methoden der einzelnen Hauptelemente dargestellt.

Risikodefinition

Das Risiko eines Ereignisses, bezogen auf eine bestimmte Referenzperiode, wird berechnet als das Produkt der Konsequenzen des Ereignisses und dessen Anzahl über die Referenzperiode.

Das Risiko wird formal berechnet über die jährliche Eintretenswahrscheinlichkeit p_i eines Ereignisses i multipliziert mit der Schadenssumme c_{ji} , die sich durch das Ereignis an einem oder mehreren Objekten ergibt. Die Schadenssumme c_{ji} des Objektes j ist abhängig von der Präsenzwahrscheinlichkeit $p_{c,j,i}$ des Objektes und dessen Verletzlichkeit $v_{c,j,i}$ bei einem gegebenen Ereignis. Die Integration über alle relevanten Ereignisse i und alle relevanten Objekte j ergibt das gesamte Risiko (in der Regel pro Zeiteinheit):

$$R = \int_{j=1}^n \int_{i=1}^m p_i \cdot c_{j|i} \, di \, dj = \int_{j=1}^n \int_{i=1}^m p_i \cdot c_j \cdot p_{c,j,i} \cdot v_{c,j,i} \, di \, dj \quad (1)$$

Das Risiko ist mathematisch gesehen der Schadenserwartungswert. In der Praxis vereinfacht sich diese Formel meist, da es sich oft um diskrete Objekte handelt, die betrachtet werden und sich die Ereignisse auch als diskrete Szenarien behandeln lassen. Damit entspricht die Formel einer einfachen Summierung von Eintretenswahrscheinlichkeit multipliziert mit den Konsequenzen. Der Schadenserwartungswert (d.h. das Risiko) erlaubt dem Entscheidungsträger zu erkennen, welche Ereignisse tatsächlich relevant sind und wie effizient sich diese Risiken durch Massnahmen reduzieren lassen.

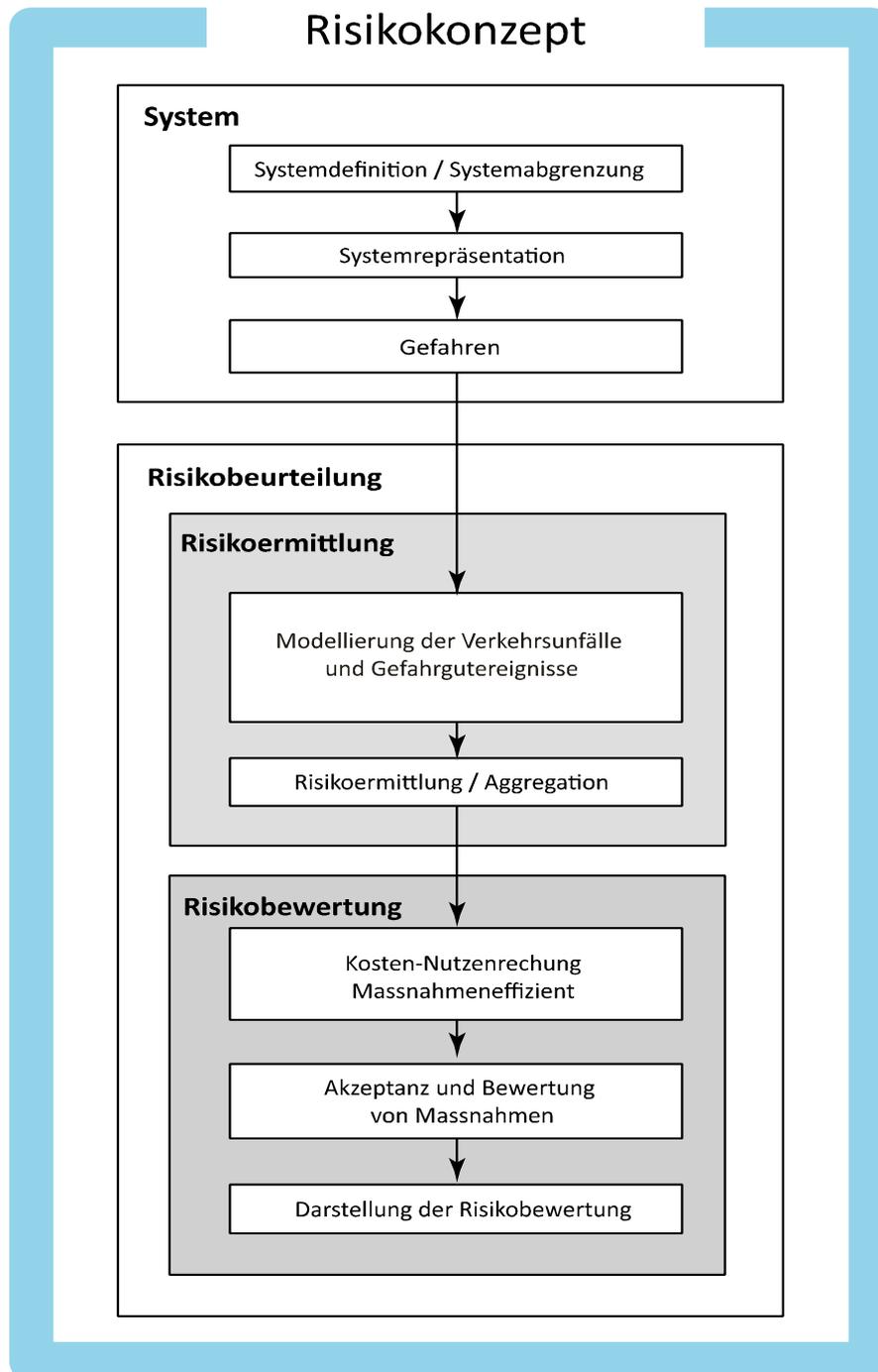


Abb. 2.1 Schematischer Ablauf des Risikokzeptes nach [28].

Konsequenzen und Ereignisraten werden auf Grundlage von Wissen bewertet, welches in Form von Daten, Modellen und Erfahrung vorliegt. In der Regel ist dieses Wissen nicht vollständig. Gründe hierfür können begrenzte Datenmengen, unzureichende Modelle und unvollständige oder nicht bestehende Erfahrung sein. Darüber hinaus weisen zukünftige Ereignisse eine natürliche Variabilität auf und deren Auftreten und Verlauf kann nicht mit Sicherheit im Voraus bestimmt werden. Die Behandlung von Unsicherheiten infolge unvollständigen Wissens spielt bei manchen Fragestellungen eine entscheidende Rolle. Unsicherheiten werden auf verschiedenen Stufen in der Risikoermittlung berücksichtigt.

2.5 System

Die Gesamtheit aller Objekte, Ereignisse, Konsequenzen, Annahmen, Vereinbarungen und Rahmenbedingungen, welche für eine bestimmte Risikobeurteilung notwendig sind, bilden das zu betrachtende System. In der Systemdefinition wird das System abgegrenzt und beschrieben, indem sämtliche relevante Fakten zusammengetragen werden (Informationen, Daten, Expertenwissen, Modelle, etc.). Die Abgrenzung des Systems hängt vom Entscheidungsträger ab und von:

- Der Fragestellung sowie Verantwortungsbereich des Entscheidungsträgers,
- dem Ansatz zur Risikoermittlung (qualitative Risikoermittlung, quantitative Risikoermittlung),
- der räumlichen und zeitlichen Abgrenzung,
- der berücksichtigten Gefahren,
- der berücksichtigten Konsequenzen sowie
- den betrachtenden Objekten, Handlungsalternativen (Massnahmen), Risikoindikatoren und Rahmenbedingungen (gesetzlich oder vom Entscheidungsträger ausgehend).

Die vorliegende Methodik beschränkt sich auf den Tunnel als System und berechnet die intrinsischen Tunnelrisiken infolge des normalen Verkehrsgeschehens und aufgrund von Gefahrgutunfällen. Das System wird in Kap. 3 definiert.

2.6 Risikobeurteilung

Die Risikobeurteilung besteht aus der Risikoermittlung und der Risikobewertung (siehe Abb. 2.1).

2.7 Risikoermittlung

Der generelle Ansatz der hier verfolgt wird, unterscheidet sich wesentlich von vielen anderer vorhandenen Methoden und Methodiken zur Risikobeurteilung in Strassentunneln. Der Hauptunterschied ist, dass zur Modellierung von Risiken Bayes'sche Netze verwendet werden. Bayes'sche Netze ermöglichen Risikobeurteilungen nach aktuellen wissenschaftlichen Standards und können prinzipiell konventionellere Modellierungsinstrumente wie Fehler- oder Ereignisbäume abbilden. Technisch sind sie diesen aber überlegen, da Unsicherheiten und Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrössen berücksichtigt werden können.

Bayes'sche Netze wurden in der Mitte der 1980er Jahre entwickelt [34]. Heute werden Bayes'sche Netze vielfältig angewendet; für Expertensysteme zur Diagnose von Krankheiten und auch im technischen Bereich. Sie werden aufgrund ihrer Flexibilität und Effizienz im Hinblick auf die Systemrepräsentation bevorzugt verwendet. Eine Einführung in die Grundlagen von Bayes'schen Netzen ist im Anhang III gegeben.

Prinzipiell sind der methodische Ansatz und die Verwendung von Bayes'schen Netzen nicht an die Verwendung einer bestimmten Software gebunden. Für die Verwendung von Bayes'schen Netzen steht eine Vielzahl verschiedener Softwareprodukte [35], [36], [37] zur Verfügung.

Generische Systemrepräsentation

Der Strassentunnel-Nutzer sowie die Betreiber von Strassentunneln sind unterschiedlichen Risiken ausgesetzt, die verschiedene Ursachen haben. Eine wesentliche Ursache für diese Risiken sind Verkehrsunfälle. Brandereignisse als Folge von Unfällen oder aufgrund technischer Probleme mit Motor oder Bremsen sind auch Ereignisse, die in Risikobewertungen von Strassentunneln berücksichtigt werden müssen. Ebenfalls relevant sind die Gefahren im Zusammenhang mit dem Transport von Gefahrgütern.

Im Allgemeinen sind Risiken in der Planungs- und Projektierungsphase einschliesslich Unterhaltsplanung von Tunneln zu berücksichtigen. Risiken können effizient durch technische und organisatorische Massnahmen reduziert werden. Hierbei können zwei verschiedene Strategien unterschieden werden: die Reduzierung der Exposition, d.h. die Reduzierung der Häufigkeit von Unfällen, Bränden oder Störfällen oder die Verringerung der Folgen, wenn sich ein Störfall, Brand oder ein Unfall ereignet. Die wichtigsten Kriterien bei der Planung solcher Massnahmen sind die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptierbarkeit der Massnahmen. Um die Effizienz der Massnahme zu beurteilen, ist der Einfluss der Massnahme auf das Risiko zu quantifizieren.

Ein Schwerpunkt der Methodik betrifft die Beurteilung der Effizienz von risikoreduzierenden Massnahmen für die Planung und Projektierung, den Betrieb und den Unterhalt der Strasseninfrastruktur im Allgemeinen. Ein wesentliches Merkmal ist, dass die Unsicherheiten und die Abhängigkeiten der Parameter, die explizit für die Modellierung von Ereignishäufigkeiten und Konsequenzen betrachtet werden, quantifiziert und berücksichtigt werden können. Die Systembestandteile werden mit sogenannten Risikoindikatoren modelliert, die das System in einer generischen Weise darstellen, d.h. es können alle möglichen Konfigurationen des Systems durch eine geeignete Wahl der Indikatoren dargestellt werden. In Abb. 2.3 ist das generelle Prinzip einer solchen generischen Systemrepräsentation für ein Tunnelsegment dargestellt. Diese Darstellung ist vereinfacht und sollte als ein anschauliches Beispiel betrachtet werden.

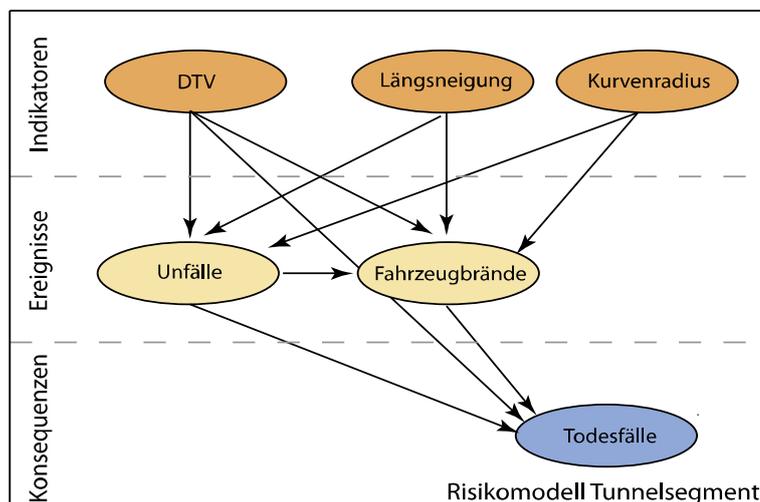


Abb. 2.2 Vereinfachte Beispieldarstellung einer generischen Systemrepräsentation eines Tunnelsegments mit Bayes'schen Netzen.

In Abb. 2.3 wird ein Tunnelsegment mit mehreren relevanten Risikoindikatoren dargestellt, d.h. das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen, die Steigung innerhalb des Segments (Längsneigung) und die maximale Entfernung zum nächsten Notausgang. Diese Indikatoren sind kausale Einflussfaktoren auf das Risiko. Qualitativ gesehen, führt eine hohe Steigung in einem Tunnelsegment zu einem Anstieg der Unfallzahlen und zur Erhöhung der Brandhäufigkeit.

Die Pfeile in Abb. 2.3 zeigen den kausalen Zusammenhang zwischen den Risikoindikatoren, den modellierten Ereignissen und den entsprechenden Konsequenzen. Die Abhängigkeiten im Modell können mit Hilfe von empirischen oder physikalischen Modellen sowie verfügbarer Daten beschrieben werden. Die Formulierung des Modells, das in Abb. 2.3 gezeigt wird, bietet ein hohes Mass an Flexibilität und Transparenz.

Das Modell für das Einzelsegment in Abb. 2.3 wird verwendet, um den gesamten Tunnel zu repräsentieren. Der gesamte Tunnel wird zunächst in homogene Segmente eingeteilt. Homogen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass alle betrachteten Indikatoren den gleichen Wert in einem bestimmten Segment des Tunnels annehmen. Dieses Segment kann dann als ein homogenes Segment betrachtet werden. Da die Länge der Segmente erheblich variieren kann, ist hier das Risiko mit Hilfe von Raten (Ereignisse pro Fahrzeugkilometer) repräsentiert.

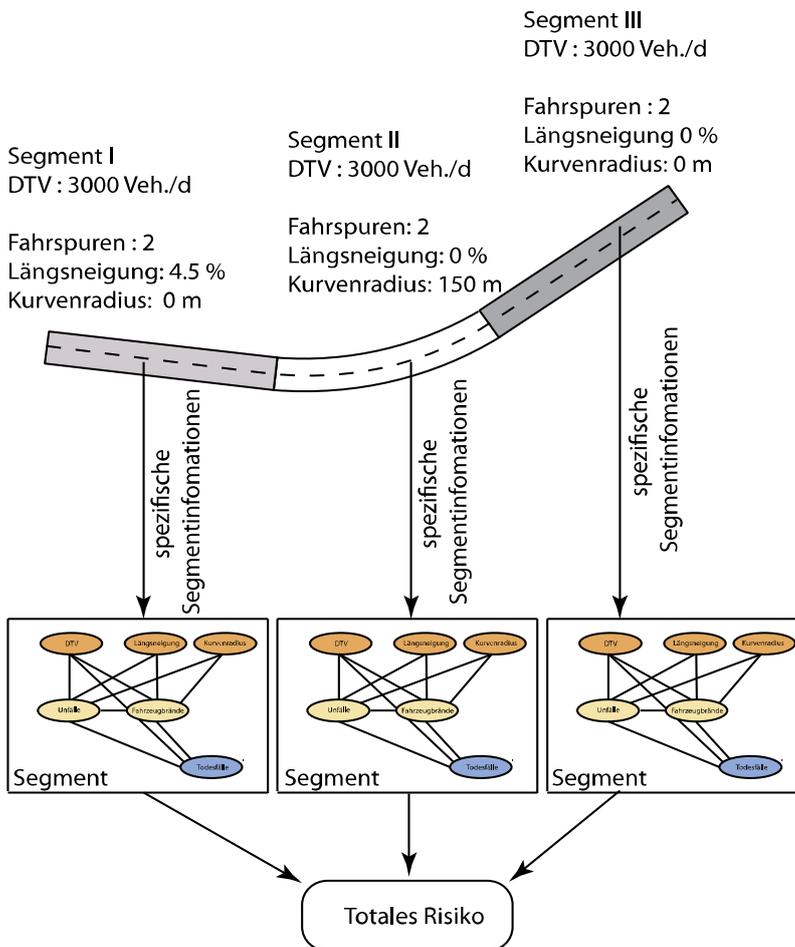


Abb. 2.3 Kombination von Segmentmodellen zur Ermittlung des Gesamtrisikos (vereinfachtes Beispiel).

In Abb. 2.3 ist die Modellierung eines gesamten Tunnels unter Verwendung der Modelle der homogenen Segmente dargestellt. In diesem Beispiel besteht der Tunnel aus drei homogenen Segmenten. Innerhalb jedes homogenen Segments sind die Risikoindikatoren konstant. Auf einer höheren hierarchischen Ebene werden die Ergebnisse der einzelnen Segmente aggregiert, und das Gesamtrisiko wird berechnet (siehe Abb. 2.3).

2.7.1 Detaillierungsgrad der Risikobeurteilung

In [12] sind für die verschiedenen Projektierungsphasen gemäss [21] unterschiedliche Detaillierungsgrade in der Risikobeurteilung vorgesehen. Die unterschiedlichen Detaillierungsgrade unterscheiden sich nur in der Anzahl der berücksichtigten Indikatoren. Immer bekannt sein müssen mindestens die Länge des Tunnels sowie die Verkehrsmenge.

Die Methode bleibt für alle Detaillierungsgrade in ihren Grundsätzen bestehen und wird nur durch die Anzahl der verwendeten Indikatoren zur Risikobeurteilung bestimmt. Bei einem größeren Detaillierungsgrad sind nicht alle Informationen über die Indikatoren vorhanden. Das Nichtvorhandensein von Informationen wird durch Wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze berücksichtigt. Für jeden dieser Indikatoren ist eine so genannte *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung im Bayes'schen Netz vorhanden. Diese Verteilung repräsentiert die gesamte Population der möglichen Ausprägungen dieses Indikators in der Schweiz. Für den Anteil Schwerverkehr ist diese Verteilung als Beispiel in Abb. 2.4 gegeben.

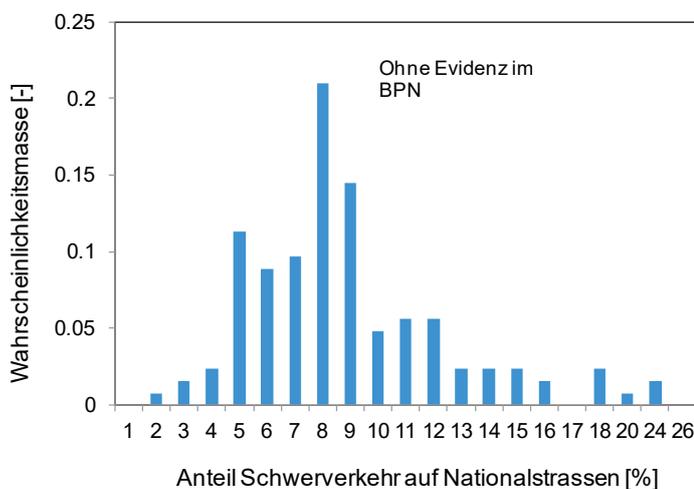


Abb. 2.4 Beispiel einer *a-priori* Verteilung für den Anteil Schwerverkehr auf Autobahnen und Nationalstrassen.

Konkret am Beispiel von Abb. 2.4 bedeutet dies, dass wenn ein Tunnelsegment aus allen möglichen Tunnelsegmenten in der Schweiz zufällig ausgewählt würde, dann würde es mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.26 einen Anteil Schwerverkehr von 8 % haben, mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.18 einen Anteil Schwerverkehr von 9 % haben, usw.

Diese *a-priori* Verteilung berücksichtigt alle möglichen Zustände des Indikators und berechnet das Risiko unter Berücksichtigung aller möglichen Ausprägungen mit der entsprechenden Eintretenswahrscheinlichkeit. Die *a-priori* Verteilungen für alle Indikatoren sind im Anhang I gegeben.

Ist die Information über den Indikator vorhanden, so wird anstelle mit den *a-priori* Verteilungen mit der konkreten Information gerechnet. Im Bayes'schen Netz wird die sogenannte „Evidenz“ eingeführt, das bedeutet, dass die Ausprägung eines Indikators mit Sicherheit bekannt ist. In diesem Fall wird der Ausprägung eine Wahrscheinlichkeit von 1.00 gegeben. Für den Schwerverkehr ist dies in Abb. 2.5 dargestellt.

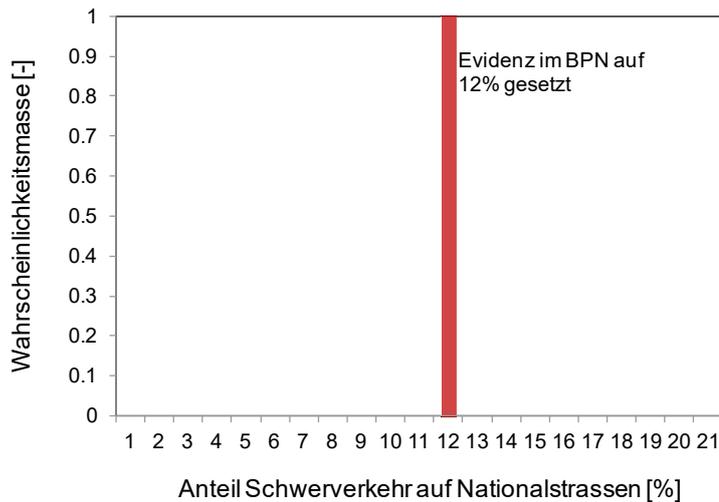


Abb. 2.5 Änderung der *a-priori* Verteilung nach Berücksichtigung der Information über den Anteil Schwerverkehr in einem Tunnelsegment.

Je mehr Informationen über die Indikatoren vorhanden sind, desto detaillierter wird das Modell und desto besser stimmt das Modell mit den tatsächlichen Bedingungen überein. Der Detaillierungsgrad der Analyse wird ausschliesslich über die berücksichtigten Informationen über die Indikatoren bestimmt.

Vollzug des Risikokonzepts mit vereinfachtem Ansatz

Die generelle Möglichkeit, unterschiedliche Detaillierungsgrade in der Analyse zu verwenden, ermöglicht es, einen vereinfachten Ansatz in der Risikobeurteilung zu verwenden. Beim Vollzug mit dem vereinfachten Ansatz werden nicht alle Informationen zur Risikoeermittlung in der Analyse verwendet. Die Indikatoren, die mindestens verwendet werden müssen, sind die Länge des Tunnels und die Verkehrsmenge sowie zusätzlich die Indikatoren, die für den Vollzug in Abhängigkeit der Projektstufe in [12] definiert sind.

Im vereinfachten Ansatz ist das Ergebnis unsicherer und das berechnete Risiko ist in der Regel grösser, als wenn der detaillierte Ansatz gewählt wird. Dies ist damit zu begründen, dass das Wissen über einige Indikatoren fehlt und die unsichere *a-priori* Information in der Analyse verwendet wird (vgl. auch Abb. 2.4 und Abb. 2.5).

Vollzug des Risikokonzepts mit detailliertem Ansatz

Beim Vollzug des Risikokonzepts mit dem detaillierten Ansatz müssen Informationen für jeden Indikator in jedem homogenen Segment des Tunnels zur Verfügung stehen. In diesem Fall werden nicht die *a-priori* Verteilungen verwendet. Damit wird das Ergebnis genauer an den tatsächlichen Bedingungen liegen.

Durch die natürlichen Streuungen in den Unfallzahlen und der zeitlichen Variabilität wird das Ergebnis der Risikoeermittlung nie exakt den Beobachtungen aus einem Jahr entsprechen. Im längerfristigen Mittel sollte dies mit dem Ergebnis der Berechnungen korrespondieren. Durch die grosse Variabilität und die grosse Anzahl an Indikatoren, die das Unfallgeschehen beeinflussen und nicht im Verantwortungsbereich des ASTRA liegen (z.B. Aufmerksamkeit des Fahrers, etc.), kann auch der Mittelwert in Einzelfällen vom Ergebnis abweichen.

2.7.2 Modellierung der Indikatoren

Das Europäische Parlament [38] schlägt eine Liste von Indikatoren vor, die in einer Risikobeurteilung mindestens berücksichtigt werden sollten. Dies sind Verkehrs- und Tunnelcharakteristiken, die das Risiko signifikant beeinflussen, sowie gängige risikoreduzierende Massnahmen. Diese Indikatoren können verwendet werden, um ein System generisch zu repräsentieren. Die Indikatoren werden auf zwei Ebenen modelliert. Zum einen durch ihre Berücksichtigung sind sie generelle Input-Parameter der Methode und können somit das Ergebnis der Risikobeurteilung beeinflussen. Zum anderen werden statistische Modelle (*a-priori* Verteilungen) für jeden dieser Indikatoren ermittelt, um die Risikoermittlung auch durchführen zu können, wenn keine Informationen über den Zustand der Indikatoren vorliegen (siehe auch Kapitel 2.7.1). Die *a-priori* Modelle werden, wenn möglich, unter Verwendung von Daten erstellt. Sind keine Daten vorhanden, so wird auf Expertenschätzung zurückgegriffen. Die *a-priori* Modelle sind in Anhang I zusammengestellt.

2.7.3 Modellierung der Ereignisse

Die Ereignisse werden in Abhängigkeit der Indikatoren modelliert. Die Modellierung der Ereignisse basiert prinzipiell auf drei Pfeilern. Wenn möglich, werden Modelle aus der Literatur verwendet. Sind keine Modelle vorhanden, werden Modelle unter Verwendung von Daten erstellt. Sind keine ausreichend verwertbaren Daten vorhanden, so erfolgt die Modellierung aufgrund von Expertenmodellen. Die konkreten Modelle sind im Kapitel 4 beschrieben. Sind neue Modelle oder Erkenntnisse vorhanden, so können die Modelle ausgetauscht werden, ohne dass die prinzipielle Modellierung mit Bayes'schen Netzen geändert werden muss.

2.7.4 Modellierung der Konsequenzen

Unter Konsequenzen sind alle Auswirkungen, die durch Ereignisse ausgelöst werden, zu verstehen. Direkte Konsequenzen treten als direkte Folge eines Ereignisses auf. Sie entstehen aus der Verletzbarkeit des Systems gegenüber einem Ereignis. Indirekte Konsequenzen treten infolge von Ereignissen auf und gehen über die direkten Konsequenzen hinaus. Dazu gehören auch Konsequenzen, welche aufgrund gesellschaftlicher Reaktionen auf das Ereignis entstehen. In der vorliegenden Methodik werden durch die Systemdefinition Todesfälle und Verletzte berücksichtigt, sowie die Zeitkosten für den Benutzer infolge von Massnahmen. Sachschäden an Infrastruktur und die Sachschäden an Fahrzeugen sind in der Regel bereits durch die Haftpflichtversicherungen der Strassenbenutzer gedeckt, die den Schaden verursacht haben und werden im hier vorliegenden Fragenkomplex nicht berücksichtigt. Umweltschäden, Staukosten und Umfahungskosten liegen ausserhalb der Systemdefinition. Die Kategorisierung der Konsequenzen ist in Abb. 2.2 gegeben.

Abb. 2.6 Kategorisierung der Konsequenzen. Die unterstrichenen Konsequenzen werden in der Methodik berücksichtigt.

	Direkte Schäden	Indirekte Schäden
Interne Konsequenzen	Sachschäden Infrastruktur	-
Externe Konsequenzen	Sachschäden Fahrzeuge, <u>Todesfälle, Verletzte,</u> Umweltschäden	Umfahrungskosten, Staukosten, <u>Zeitkosten</u>

Innerhalb des Forschungsprojektes AGB 2005/102 [28] wurde der Aspekt der möglichen Berücksichtigung von Risikoaversionseffekten diskutiert und es wurde empfohlen, Risikoaversion nicht in eine Risikobewertung einzubeziehen. Dieser Empfehlung wurde hier gefolgt.

2.7.5 Risikoermittlung, Unsicherheiten und Abhängigkeiten

Ist das Modell vollständig vorhanden, kann es zur Risikoermittlung verwendet werden. Hierzu wird die vorhandene Information in den Indikatorknoten des Bayes'schen Netzes berücksichtigt, indem in diesen Knoten Evidenz auf einen bestimmten Zustand gesetzt wird. Konkret wird dadurch die *a-priori* Verteilung ersetzt durch eine sichere Information. Mit dieser Information werden die Konsequenzen berechnet. Die Konsequenzen sind auf die Einheit Fahrzeugkilometer pro Jahr normiert und müssen mit den Fahrzeugkilometern der einzelnen homogenen Segmente multipliziert werden, um das Ergebnis für das einzelnen Segment zu erhalten. Die Unsicherheiten werden in den Knoten repräsentiert. Wird Evidenz in den Knoten gesetzt, so ist in Bezug auf die Indikatoren keine Unsicherheit vorhanden. Modellunsicherheiten werden implizit berücksichtigt.

Die Abhängigkeiten sind explizit über die Kanten im Bayes'schen Netz berücksichtigt (siehe Anhang III). Der Vorteil der Bayes'schen Netze ist, dass auch nichtlineare Abhängigkeiten berücksichtigt werden können.

2.7.6 Aggregation von Risiken

Mit der Aggregation von Risiken wird es möglich, einen Gesamtüberblick über die Risiken eines Systems herzustellen, um diese gesamthaft behandeln zu können. Dazu ist es erforderlich, dass die Risiken für verschiedene Objekte auf eine vergleichbare Art und Weise ermittelt und in geeigneter Weise zu einem totalen Risiko aggregiert werden. Das reine Aufsummieren der Risiken aus unterschiedlichen Elementen des Verkehrssystems ist nicht immer ausreichend. Bestehen gemeinsame Einflussfaktoren oder Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den zu aggregierenden Risiken, so ist dies in geeigneter Weise bei der Aggregation zu berücksichtigen.

2.8 Risikobewertung

2.8.1 Effizienz von Massnahmen

Optimale Entscheidungen und Identifizieren von Handlungsalternativen werden über die Maximierung des Nutzens und die Minimierung der Kosten identifiziert. Der Erwartungswert des Nutzens und der Erwartungswert der Konsequenzen werden quantifiziert. Die so identifizierte, optimale Entscheidungsoption muss anschliessend auf ihre Konformität mit gesellschaftlichen Präferenzen geprüft werden. Im Vordergrund steht dabei die Personensicherheit.

Das ASTRA hat als Behörde die Verantwortung, dass eine ausreichende Sicherheit für alle Personen im öffentlichen Raum der Nationalstrassen gewährleistet ist. Die Bewertung der Zulässigkeit von Handlungsalternativen (Massnahmen oder Massnahmenkombinationen) legt für den Einzelfall fest, was gesellschaftlich als ausreichende Sicherheit angesehen werden kann. Aus den Empfehlungen des Forschungsprojektes AGB 2005/102 leiten sich folgende Vorgaben ab:

- Die optimale Massnahme oder Massnahmenkombination wird anhand einer geeigneten Zielfunktion identifiziert.
- Die optimale Massnahme oder Massnahmenkombination wird auf ihre Akzeptierbarkeit überprüft, d.h. nach dem Grenzkostenprinzip aber auch auf die Einhaltung bestehender Gesetze, Normen und Richtlinien.

- Das Verhältnis von jährlicher Risikoreduktion von Massnahmen zu den Massnahmenkosten ergibt eine erste Entscheidungsgrundlage. Sind die jährlichen Kosten für die Massnahme grösser als die jährliche Risikoreduktion, so ist die Massnahme (oder das Massnahmenpaket) nicht effizient und sollte nicht umgesetzt werden. Im anderen Fall lohnt sich die Umsetzung und die Mittel sind effizient (Kap. 5). In begründbaren Fällen, z.B. aufgrund gesetzlicher Anforderungen) können auch nicht effiziente Massnahmen umgesetzt werden.

2.8.2 Risikoakzeptanz

Die Identifikation möglicher Massnahmen zur Risikoreduktion und deren Beurteilung bezüglich der Effizienz ist ein fast durch alle möglichen Fragestellungen vorgegebener inhärenter Bestandteil der Methodik zur Beurteilung von Tunnelrisiken. Nach den Empfehlungen des Forschungsprojektes AGB 2005/102 [28] soll/sollen:

- das Set berücksichtigter Massnahmen allen bekannten/üblichen Lösungsansätzen entsprechen,
- aus den identifizierten Massnahmen sinnvolle Massnahmenkombinationen gebildet werden,
- alle Massnahmen und sinnvollen Massnahmenpakete auf ihre Effizienz überprüft werden.

Hierfür ist es notwendig, dass die jährliche Risikoreduktion infolge von Massnahmen ebenfalls berechnet wird. Die Kosten für die Massnahme und dessen Unterhalt sind ebenfalls als jährliche Kosten zu berechnen. Dafür müssen alle Kosten für beispielsweise die Umsetzung der Massnahme und für den Unterhalt der Massnahme zunächst auf den Entscheidungszeitpunkt bezogen werden (z.B. mit der Barwertmethode) und anschliessend über die Lebensdauer der Massnahme verteilt werden und als jährliche Kosten berechnet werden (z.B. mit der Annuitätenmethode).

Die Akzeptierbarkeit des Risikos wird mit dem ALARP (As Low as Reasonably Practicable) Konzept bewertet. Hierfür wird zunächst das Risiko berechnet und geprüft, ob es einen bestimmten oberen Grenzwert übersteigt. Liegt eine Überschreitung vor, so sind Massnahmen zu suchen, die das Risiko reduzieren. Es sollten die effizientesten Massnahmen eingesetzt werden. Gibt es Massnahmen, die das Risiko unterhalb dieses Grenzwertes reduzieren oder liegt das Risikoniveau bereits vor den Massnahmen unterhalb dieses Grenzwertes, so wird geprüft, ob es weitere Massnahmen gibt, die zumutbar sind. Zumutbar bedeutet, dass die Kosten der Massnahmen für die Verhinderung eines Todesfalls nicht übermässig hoch sind, d.h. über einem vorgegebenen Wert, den sogenannten Grenzkosten, liegen. Gibt es zumutbare Massnahmen, so sind diese auszuführen. Gibt es keine Massnahmen, so ist das Risiko tolerierbar.

Neben dem oberen Grenzwert wird auch ein unterer Grenzwert aus praktischen Gründen festgelegt. Liegt das Risiko unter diesem unteren Grenzwert, so sind keine Massnahmen und keine weiteren Analysen notwendig. In diesem Fall ist das bestehende Risiko tolerierbar. Detailliert wird das Prinzip in Kapitel 5.6.1 erklärt.

2.9 Ablauf einer Risikobewertung

Nachdem der Bedarf einer Risikobewertung gemäss [12] festgestellt wurde, ist der generelle prozedurale Ablauf einer Risikobeurteilung in Abb. 2.7 dargestellt.

Ist gemäss [12] keine Risikoermittlung erforderlich, so ist das vorhandene Risikoniveau unbekannt, wird jedoch ohne weitere Analyse als tolerierbar eingeschätzt.

Eine Risikobeurteilung kann in unterschiedlichen Projektphasen gemäss [21] einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad haben. Als Grundsatz gilt, dass unabhängig vom geforderten Detaillierungsgrad immer alle vorhandenen Informationen berücksichtigt werden. Vorhandene Informationen dürfen nicht bewusst vernachlässigt werden.

Als erster Schritt ist das System zu definieren (Kap. 3).

In der Systemdefinition sind alle Informationen zum Verkehr, zur räumlichen und zeitlichen Abgrenzung des Systems zusammenzustellen (Kap. 3.1). Hierin enthalten ist auch eine allgemeine Beschreibung der Tunnelanlage.

Danach ist die Systemrepräsentation zu erstellen. In der Systemrepräsentation sind alle vorhandenen Informationen über die Indikatoren zum Verkehr, Bauwerk und den Nebenanlagen zusammenzustellen (Kap. 3.2). Die Anzahl der berücksichtigten Indikatoren ist abhängig von der Projektphase und vom geforderten Detaillierungsgrad.

Die zu berücksichtigenden Gefahren und Ereignisse sind in Kap. 3.3 definiert.

Ist das System definiert, kann die Risikoermittlung durchgeführt werden. Die Risikoermittlung berücksichtigt Verkehrsunfälle und Brandereignisse, die aus Unfällen oder Überhitzung der Fahrzeuge resultieren (Kap. 4.2) sowie Gefahrgutereignisse (Kap. 4.3) und deren Konsequenzen für die Tunnelnutzer.

Mit der Zusammenstellung und der Aggregation der Ergebnisse der Risikoermittlung (Kap. 4.4) ist die Risikoermittlung abgeschlossen.

Für den Fall, dass noch keine Massnahmen betrachtet wurden und die Risikoermittlung für ein Projekt das erste Mal durchgeführt wurde (Ist-Zustand für die Erhaltungsprojekte und Ausbauprojekte), wird zunächst das vorhandene Risikoniveau bewertet. Liegt das Risikoniveau unterhalb des in Kap. 5.6.1 festgelegten unteren Grenzwerts G_I , so ist das Risiko tolerierbar. Die Risikobeurteilung wird gemäss Kapitel 6 in einem Bericht dargestellt.

Liegt das Risikoniveau oberhalb des Grenzwertes G_I , so sind risikoreduzierende Massnahmen und Massnahmenkombinationen zu definieren (Kap. 5.2). Für jede Massnahme bzw. Massnahmenkombination wird erneut eine Risikoermittlung gemäss Kapitel 4 durchgeführt. Für die definierten Massnahmen wird dann eine Massnahmennutzenrechnung (Kap. 5.3) und eine Massnahmenkostenrechnung (Kap. 5.4) durchgeführt sowie die Massnahmeneffizienz (Kap. 5.5) bestimmt. Gemäss den Akzeptanzkriterien, die in Kapitel 5.6 beschrieben sind, wird das Risiko bewertet. Liegt das Risiko im Ausgangssystem oberhalb des oberen Grenzwertes G_{II} (Kap. 5.6.1), so wird zunächst geprüft, ob das Risiko mit den effizientesten Massnahmen auf ein Niveau unterhalb des Grenzwertes G_{II} gebracht werden kann. Wenn dies erreicht ist, müssen zusätzliche Massnahmen getroffen werden, wenn diese nach dem Grenzkostenkriterium sinnvoll und zumutbar sind (Kap. 5.7). Die Ergebnisse der Risikobewertung sind in einem Risikobericht zusammenzustellen und die Massnahmen in der Projektierungsebene umzusetzen (Kap. 6).

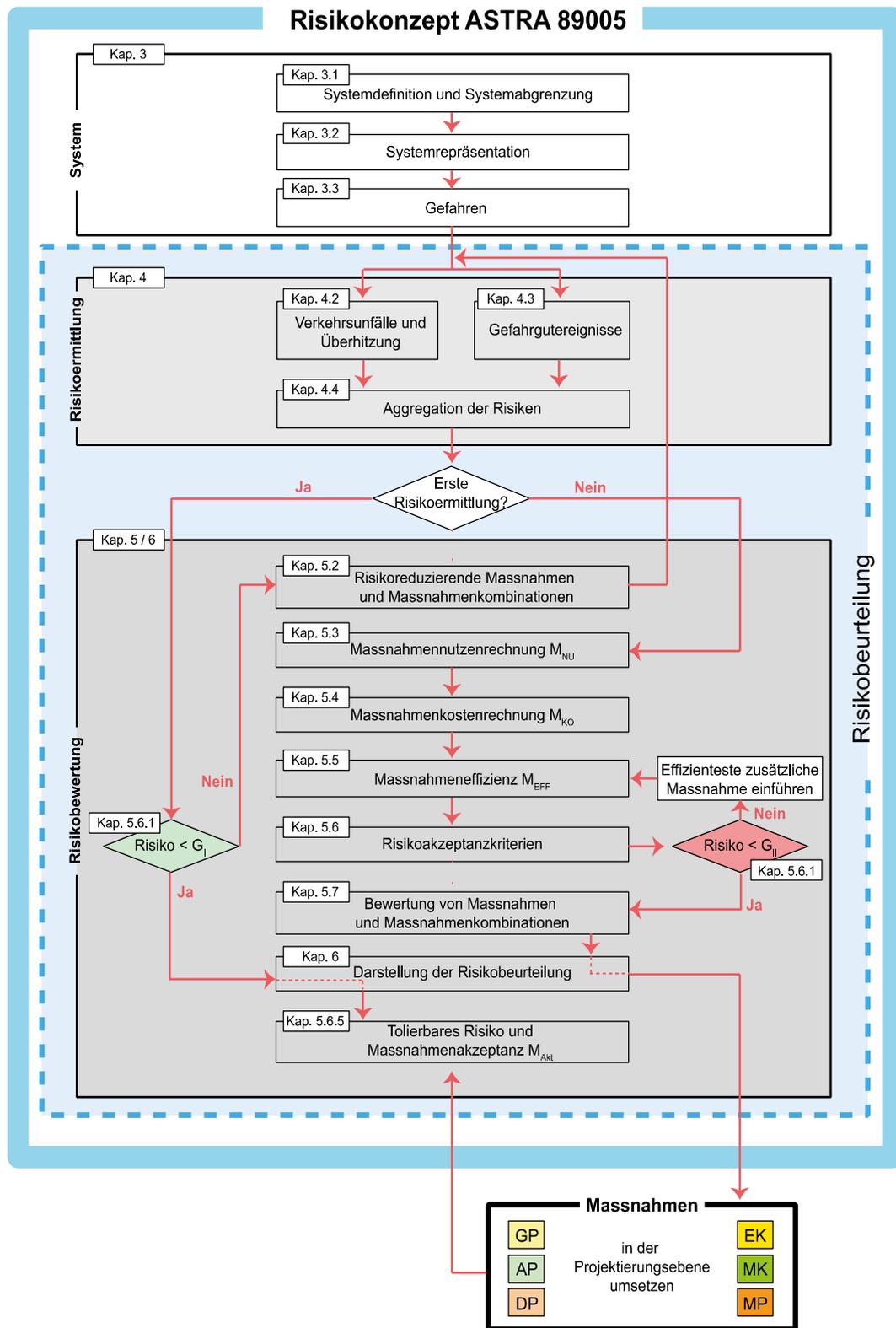


Abb. 2.7 Ablaufschema einer Risikobewertung von Tunneln der Nationalstrassen.

3 System

3.1 Systemdefinition und Systemabgrenzung

Es werden alle als Tunnel klassierten Bauwerke für den motorisierten Strassenverkehr im Verantwortungsbereich des ASTRA berücksichtigt. Die Methodik ist prinzipiell auf Strassentunnel mit einer Länge von 300 m und länger ausgelegt.

Brücken, Überführungen oder Wildtierquerungen, die unterfahren werden und die eine Breite von mehr als 300 m haben, zählen ebenfalls zu Bauwerken mit tunnelähnlichen Zuständen und können beurteilt werden.

Ausgeschlossen sind Anlagen für den ruhenden Verkehr sowie Zufahrten zu solchen Anlagen.

3.1.1 Abgrenzung des Bauwerktyps

Die Methodik ist gültig für Strassentunnel im Nationalstrassennetz, die eine Länge von mehr als 300 m haben. In Einhausungen und in Galerien herrschen teilweise tunnelähnliche Zustände, die mit der vorliegenden Methodik beurteilt werden können.

Die Beleuchtungssituation in Galerien, die einseitig geöffnet sind, kann signifikant besser als in beleuchteten Tunneln. Diesem Effekt ist Rechnung zu tragen und die Leuchtstärke ist projektspezifisch zu bestimmen.

In Bezug auf die Rauchausbreitung nach Bränden sind die Grösse der Öffnungen und der mögliche Rauchaustritt zu berücksichtigen. Da Galerien und Einhausungen selten Lüftungsanlagen haben, muss bestimmt werden, welchem Lüftungstyp die Öffnungen entsprechen.

In Bezug auf die Entfluchtung muss geprüft werden, ob und in welchem Abstand eine Flucht durch die Öffnungen möglich ist.

Einseitig vollständig geöffnete Galerien, wie etwa leichte Steinschlaggalerien, oder ein- bzw. zweiseitig geöffnete Kunstbauten mit einer Öffnungsfläche von mehr als 80 % und einer geschlossenen Decke können nicht mehr als tunnelähnlich betrachtet werden und liegen ausserhalb des Gültigkeitsbereichs der Methodik.

3.1.2 Räumliche Abgrenzung

Betrachtet werden der Tunnel sowie die Strasse 50 m vor dem Tunnelportal und 50 m nach dem Tunnelportal. Die Portalzonen sind in der Systemgrenze enthalten. Alle Ereignisse ausserhalb dieses Bereichs, wie beispielsweise Umwegkosten für den Strassenbenutzer durch Sperrungen werden nicht berücksichtigt. Ist dies in einem Projekt notwendig, kann die Risikobeurteilung gemäss [39] erweitert werden.

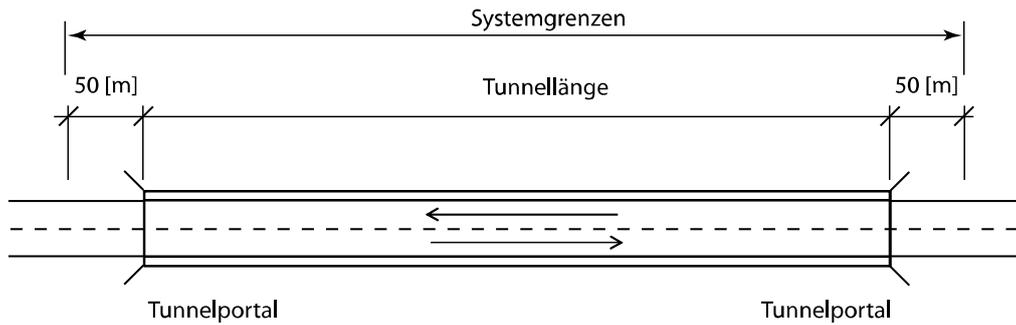


Abb. 3.1 Prinzipielle Systemabgrenzung.

Berechnet werden immer die Risiken für eine Fahrtrichtung. Die Risiken für beide Richtungen sind entsprechend zu aggregieren. Hierzu werden im folgenden Hinweise gegeben. Das Risiko wird nur für den Bereich des definierten Systems berechnet und beurteilt.

Portal

Als Portal wird nicht das Portalbauwerk verstanden, sondern der diskrete Punkt an der Tunnelein- bzw. ausfahrt, an dem der Tunnelquerschnitt vollständig geschlossen ist. Dies ist in Abb. 3.2 dargestellt.

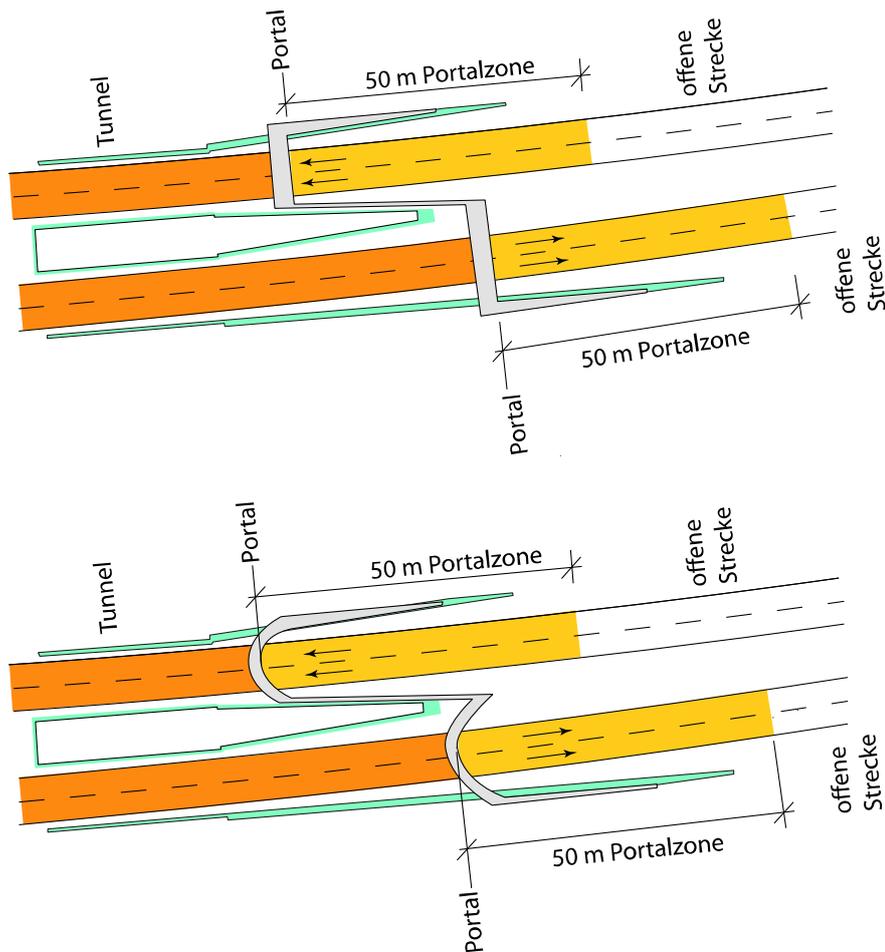


Abb. 3.2 Definition des Portals für verschiedene Portalarchitekturen.

Tunnellänge

Die Tunnellänge entspricht der Länge der Trassierungsachse zwischen zwei Portalen. Bei Tunnelsystemen oder Einfahrten in Tunneln kann die Tunnellänge auch die Länge der Trassierungsachse von der Portalzone bis zur Einfahrt in einen anderen Tunnel sein. Gleiches gilt für Ausfahrten und ist analog anzuwenden für ähnliche Tunnelsysteme, die beispielsweise zwei Tunnel miteinander verbinden.

3.1.3 Zeitliche Abgrenzung

Die Risiken sind als jährliche Risiken zu bewerten [40]. Alle Schäden und Kosten werden als jährliche Schäden und Kosten berechnet (Kapitel 4 und Kapitel 5.4). Die Akzeptanzgrenzen werden expositionsunabhängig in Ereignisse in Fahrzeugkilometer pro Jahr festgelegt. Als Exposition werden die Fahrzeugkilometer pro Jahr definiert.

Die zeitliche Abgrenzung in Bezug auf die Massnahmen ist durch die Lebensdauer der Massnahmen gemäss [16] definiert. Details hierzu finden sich in Kapitel 5.4.

Saisonale Schwankungen des Verkehrs

Die saisonalen Schwankungen der Verkehrsmenge im Tunnel können so gross sein, dass eine Betrachtung des Jahresdurchschnitts nicht ausreichend ist. So kann es vorkommen, dass der Verkehr oder der Anteil Schwerverkehr im Sommer um den Faktor 2 bis 10 höher ist als im Winter. In diesem Fall sind Betrachtungen für verschiedene Perioden im Jahr anzustellen und das Risiko für jede dieser Periode zu berechnen. Die Risiken können dann gewichtet addiert werden. Sind die Bedingungen im Jahresverlauf sehr unterschiedlich, so ist auch die Akzeptierbarkeit der Risiken getrennt für diese Perioden gemäss Kapitel 5 zu beurteilen. Die berechneten Raten sind nicht summierbar, es kann aber ein gewichtetes Mittel gebildet werden.

Zeitliche Entwicklungen

Die zeitliche Entwicklung der Unfallraten und der Verkehrsmengen wird von der Methodik nicht berücksichtigt. Es ist möglich, die Verkehrsmengen über einen gewissen Zeithorizont zu extrapolieren. Nicht berücksichtigt wird diese Entwicklung in der Massnahmenplanung und Massnahmenbeurteilung. Bei Problemstellungen, die eine besondere Situation darstellen und in denen keine Lösung mit den bestehenden Ansätzen gefunden werden kann, kann die zeitliche Entwicklung berücksichtigt werden.

3.1.4 Ist-Zustand

Bei Ausbau- und Erhaltungsprojekten ist der Ist-Zustand generell durch die Bauwerkscharakteristiken zum Stand der Projektverfassung gegeben. Massnahmen sind im Ist-Zustand nicht enthalten. Die Verkehrscharakteristiken im Ist-Zustand entsprechen in der Regel den prognostizierten Verkehrscharakteristiken die in 15 Jahren vorherrschen.

Bei Neubauprojekten ist der Ist-Zustand durch den Planungszustand gegeben. Die Bauwerkscharakteristiken entsprechen den Planvorgaben. Die Verkehrscharakteristiken entsprechen den prognostizierten Verkehrscharakteristiken, die in 15 Jahren nach Umsetzung des Projektes vorherrschen.

3.1.5 Zustand nach Massnahmen

Bei allen Projekten ist der Zustand nach Massnahmen generell definiert durch den Zustand nach Umsetzung der Massnahmen und die Verkehrscharakteristiken 15 Jahre nach Umsetzung der Massnahmen. Die Verkehrscharakteristiken sollten konsistent zum Ist-Zustand sein. Das bedeutet, dass wenn Massnahmen erst in der Zukunft geplant sind z.B. in 5 Jahren, die Verkehrscharakteristiken nach Massnahmen entsprechend in 20 Jahren zu berücksichtigen sind. Die Beurteilung des Ist-Zustandes ist dann auch für den Zustand der Verkehrscharakteristiken in 20 Jahren durchzuführen.

3.2 Systemrepräsentation

Das Tunnelsystem wird, wie in Kapitel 0 vereinfacht dargestellt ist, unter Verwendung von Bayes'schen Netzen repräsentiert. Eine detaillierte Beschreibung der entwickelten Bayes'schen Netze findet sich in Kapitel 4.2.1. Die Bayes'schen Netze enthalten Risikoindikatoren. Risikoindikatoren enthalten quantifizierbare Informationen über das Risiko und können als Eingangsgrössen für die Berechnung des Risikos dienen. Die Indikatoren haben diskrete Zustände und enthalten Informationen über die Eintretenswahrscheinlichkeit verschiedener Ereignisse oder Zustände. Im Bayes'schen Netz entsprechen die Risikoindikatoren den Knoten.

3.2.1 Indikatoren

Das Kernelement der Methodik ist die Modellierung von Konsequenzen (Unfälle, Brände, Gefahrgutereignisse, Todesfälle, etc.) in Abhängigkeit von den Charakteristiken des Systems (Tunnelanlage, Strassenanlage, Verkehr). Die in der Methodik berücksichtigten Charakteristiken enthalten sicherheitsrelevanten Einflussfaktoren, die grundsätzlich vom Entscheidungsträger beeinflussbar sein können. Diese sind die Faktoren im System, die einen relevanten Einfluss auf die erwarteten Konsequenzen (Risiken) haben und ggf. durch Massnahmen beeinflusst werden können. Ausserhalb des Einflussbereichs sind hier beispielsweise Charakteristiken des Fahrers.

In der UVEK Weisung ASTRA 74001 Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstrassennetz [7] respektive in der Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 [38] wird beschrieben, dass die in einem Tunnel durchzuführenden Sicherheitsmassnahmen, unter systematischer Berücksichtigung aller Aspekte des durch die Infrastruktur, den Betrieb, die Nutzer und die Fahrzeuge gebildeten Systems, bestimmt werden müssen. Die folgenden Parameter sind gemäss der UVEK Weisung und 2004/54/EG zu berücksichtigen:

- | | |
|---------------------|--|
| Verkehr | <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre (einschliesslich der zeitlichen Verteilung); • Geschwindigkeitsbezogene Aspekte; • Gefahr täglicher oder saisonaler Staubildung; • Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs; • Vorkommen und Anteil des Lkw-Verkehrs. |
| Bauwerk | <ul style="list-style-type: none"> • Länge des Tunnel; • Anzahl der Tunnelröhren; • Anzahl der Fahrstreifen; • Breite der Fahrstreifen; • Horizontale und vertikale Linienführung; • Bauart; • Richtungsverkehr oder Gegenverkehr; • Charakteristiken der Zubringerstrassen; • Geografisches und meteorologisches Umfeld. |
| Nebenanlagen | <ul style="list-style-type: none"> • Zugriffszeit der Einsatzdienste. |

Ausserdem ist eine Reihe von Massnahmen in der 2004/54/EG [38] als Minimalanforderungen angegeben. Diese Massnahmen, die in Abb. 3.3 und Abb. 3.4 zitiert sind, haben nach 2004/54/EG auch einen wichtigen Einfluss auf die Tunnelsicherheit. Diese Massnahmen sind gemäss [7] einzuhalten.

Die ASTRA-Richtlinien, Fachhandbücher und Normen, die relevant für Tunnelsicherheit sind (zB. ASTRA 13001 - ASTRA 13011 und Norm SIA 197, Norm SIA 197/2), beinhalten die schweizerische Umsetzung der Europäischen Minimalanforderungen.

Die ASTRA-Richtlinien und Fachhandbücher beinhalten einige zusätzliche Parameter, die auch Einfluss auf die Tunnelsicherheit haben, z.B.:

- Tunnelhöhe
- Pannestreifen
- Bankettbreite und -höhe
- Hydranten und Löscheinrichtungen
- SOS-Nischen

Die in diesem Bericht beschriebene Methodik beinhaltet die meisten der oben erwähnten Parameter/Indikatoren. Gewisse Aspekte werden als Stand der Technik vorausgesetzt und werden somit nicht als Parameter in der Methodik betrachtet. Es wird z.B. davon ausgegangen, dass Rettungswege rauchfrei gehalten werden. Somit stellen baulichen Massnahmen sicher, dass Rezirkulation von Rauch und Schadstoffen von einer Tunnelröhre in eine andere und zwischen Abluftbauwerken und Aussenluftfassungen bzw. Portalen vermieden wird, wie es [10] und [11] beschrieben ist.

Abb. 3.3 Übersichtstabelle der Indikatoren mit Mindestanforderungen für das Bauwerk.

Art		Typ	Dokument / Referenz
Bauwerk	Bauliche Massnahmen	Anzahl Röhren	ASTRA 74001 Kap. 5.3.1
		Querneigung und Längsneigung und Kurvenradius	SIA 197/2 Zf. 8.2
		Begehbare Querverbindungen	SIA 197/2 Zf. 8.8.4
		Fluchtwege	SIA 197/2 Zf. 8.8.2 und Zf. 8.8.3
			ASTRA 13011
		Befahrbare Querverbindungen	SIA 197/2 Zf. 8.8.5
		Überqueren des richtungsfahrtrennenden Mittelstreifens vor jedem Tunnelportal	SIA 197/2 Zf. 8.9
		Ausstellbuchten	SIA 197/2 Zf. 8.8.2.2
			ASTRA 74001 Kap. 5.3.2
		Ableitung entzündlicher und toxischer Flüssigkeiten	SIA 197/2 Zf. 8.7
Feuerfestigkeit von baulichen Anlagen	SIA 197/2 Zf. 7.4.1		

Abb. 3.4 Übersichtstabelle der Indikatoren mit Mindestanforderungen für die Nebenanlagen.

Art		Typ	Dokument / Referenz
Nebenanlagen	Beleuchtung	Allgemeine Beleuchtung	SIA 197/2 Zf. 9.3.2
			SN 640 551-1 Zf. 8
		Notbeleuchtung	SIA 197/2 Zf. 9.3.2
			SN 640 551-1 Zf. 8.2.7
		Brandnotbeleuchtung	SIA 197/2 Zf. 9.3.2
			SN 640 551-1 Zf. 8.2.8
	Lüftung		SIA 197/2 Zf. 9.4
			ASTRA 13001
			ASTRA 13002
	Notruftelefon		SIA 197/2 Zf. 9.6
	Löschwasserversorgung		SIA 197/2 Zf. 9.7
	Signalisation und Markierung		SIA 197/2 Zf. 9.5
			ASTRA 13010
			SSV Art. 62 Abs. 7
	Leitzentralen		SIA 197/2 Zf. 8.10 und Zf. 9.2
	Überwachungssysteme	Videoanlagen	SIA 197/2 Zf. 9.6.4.
			ASTRA 13005
		Automatische Branddetektion	SIA 197/2 Zf. 9.6.3
			ASTRA 13004/ASTRA 13005
	Einrichtungen zur Sperrung des Tunnels	Lichtsignalanlagen vor den Tunnelleingängen	ASTRA 15003 Kap. 3.8 und 2.3
Lichtsignalanlagen im Tunnel		ASTRA 15003 Kap. 3.8 und 2.3	
Kommunikationssysteme	Tunnelfunk für Ereignisdienste	SIA 197/2 Zf. 9.6.5	
		ASTRA 13006	
	Rundfunk-Sicherheitsdurchsagen für Tunnelnutzer	ASTRA 13006 Kap. 5.6	
Lautsprecher in Schutzräumen und Ausgängen	Keine Anforderungen		
Notstromversorgung		SIA 197/2 Zf. 9.8	
Feuerfestigkeit von Tunnelbetriebseinrichtungen		SIA 197/2 Zf. 8.10.3 und Zf. 8.8.6, Zf. 9.3.4	

Die Indikatoren sind an drei Workshops (06.12.2011, 17.04.2012 und 18.04.2012) diskutiert worden, und schweizerische und internationale Experten haben verifiziert, dass die folgenden Indikatoren relevant sind und den grössten Einfluss auf das Tunnelrisiko haben [41]. Die Modellierung der Indikatoren ist in Kapitel 4 beschrieben.

Verkehrscharakteristiken

- | | |
|----------------|---|
| Verkehr | <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre: DTV, tägliche Verteilung, saisonale Verkehrsaufkommen; • Vorkommen und Anteil des Schwerverkehrs; • Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs; • Stauaufkommen; • Geschwindigkeitsbezogene Aspekte: beschilderte Geschwindigkeit, variable Geschwindigkeitsbegrenzung, gefahrene Geschwindigkeit. |
|----------------|---|

Nach Bedarf wird die Methodik in Zukunft erweitert, um weitere relevante Parameter zu berücksichtigen.

Tunnelcharakteristiken

- | | |
|---------------------|---|
| Bauwerk | <ul style="list-style-type: none"> • Länge des Tunnels; • besondere Gegebenheiten im Portalbereich, Ein- und Ausfahrtzonen; • Ein- und Ausfahrten (unterirdische Rampen/Kreuzungen); • horizontale und vertikale Linienführung: Neigung, Kurvenradien, Querneigung; • Breite der Fahrstreifen; • Anzahl der Fahrstreifen; • Anzahl der Tunnelröhren, Richtungsverkehr oder Gegenverkehr; • Tunnelhöhe; • Notausgänge: Abstände; • Abläufe (Schlitzrinnen oder diskrete Abläufe: Abstände, Dimensionen). |
| Nebenanlagen | <ul style="list-style-type: none"> • Beleuchtung des Fahrraumes; • Brandnotbeleuchtung; • Kontroll- und Überwachungseinrichtungen, Brandalarm; • Lüftung: natürliche Lüftung, Lüftung ohne Absaugung, Lüftung mit Absaugung. |

3.2.2 Länge des Tunnels

Die Länge des Tunnels ist neben der Verkehrsmenge eine wesentliche Eingangsgrösse für die Risikobeurteilung, ohne die das Risiko nicht berechnet werden kann. Die Länge des Tunnels ist gemäss der räumlichen Abgrenzung festzulegen.

3.2.3 Zonen

In Statistiken von Unfällen in Tunneln wurde beobachtet, dass die Unfallraten über die Tunnellänge variieren; sie sind signifikant höher in den Einfahrtportalbereichen als in der Mitte des Tunnels. Aus dieser Beobachtung heraus wurden zunächst vier unterschiedliche Zonen im Tunnel definiert [42]. Ebenfalls wurde beobachtet, dass vor dem Portal die Unfallrate im Vergleich zur offenen Strecke höher ist [43] [44]. Auf der anderen Seite wurde beobachtet, dass die Konsequenzen innerhalb des Tunnels in der Regel höher sind. Mit diesen Erkenntnissen erscheint es sinnvoll, den Tunnel in diskrete Zonen einzuteilen. In [42] wird vorgeschlagen, den Tunnel in vier Zonen zu unterteilen.

- Zone 1: 50 m vor dem Portal;
- Zone 2: die ersten 50 m nach dem Portal;
- Zone 3: die nächsten 100 m im Tunnel;
- Zone 4: ab 150 m Entfernung vom Portal.

Diese Diskretisierung wird prinzipiell auch in dieser Methodik verwendet. Sie wird konzeptionell auf die Ausfahrtzonen erweitert und die Zonen 1 bis 4 nur für den Einfahrtbereich verwendet. Es werden somit zusätzlich 3 Zonen berücksichtigt:

- Zone 5: 150 m bis 50 m vor dem Ausfahrtsportal;
- Zone 6: 50 m bis 0 m vor dem Ausfahrtsportal;
- Zone 7: nächsten 50 m nach dem Ausfahrtsportal.

Dabei ist zu beachten, dass nur in Tunneln länger als 300 m alle Zonen repräsentiert sind.

Durch die derzeit noch begrenzte Datenlage für die Abschätzung von Unfallraten in den Zonen 5, 6 und 7 werden die Unfallraten mit Hilfe von wenigen Beobachtungen abgeschätzt.

In Abb. 3.5 ist die Einteilung in 7 Zonen dargestellt.

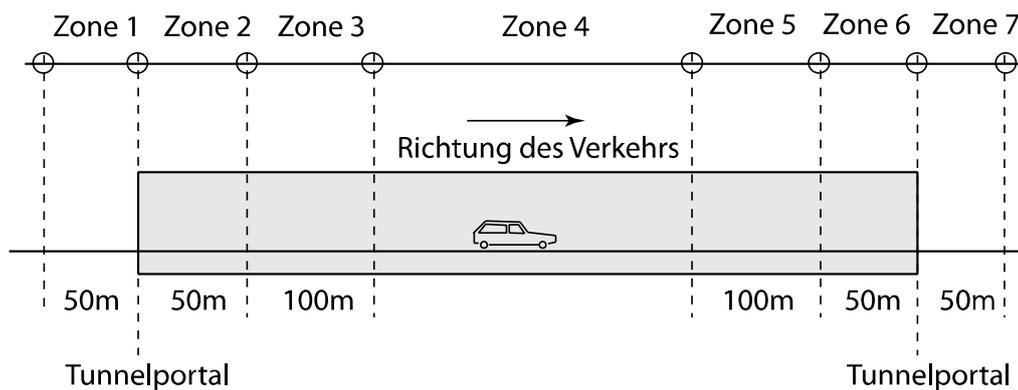


Abb. 3.5 Illustration der verschiedenen Zonen im Tunnel.

3.2.4 Homogene Segmente

Ein Streckenabschnitt innerhalb des Tunnels ist homogen, wenn alle Risikoindikatoren auf diesem Streckenabschnitt ihre Werte nicht ändern, d.h. konstant bleiben. Ein homogenes Segment endet, sobald sich eine Einflussvariable verändert. In Abb. 3.6 ist schematisch und beispielhaft das Vorgehen bei der Ermittlung der Anzahl und der Ausdehnung der homogenen Segmente über die Tunnelänge dargestellt. In diesem Beispiel ergeben sich aus der allgemeinen Tunnelcharakteristik 9 homogene Segmente, 7 durch die Definition der Zonen (siehe Kap. 3.2.3) im Tunnel, 1 zusätzliches Segment durch den Wechsel in der Längsneigung und 1 zusätzliches Segment durch den Wechsel im Kurvenradius.

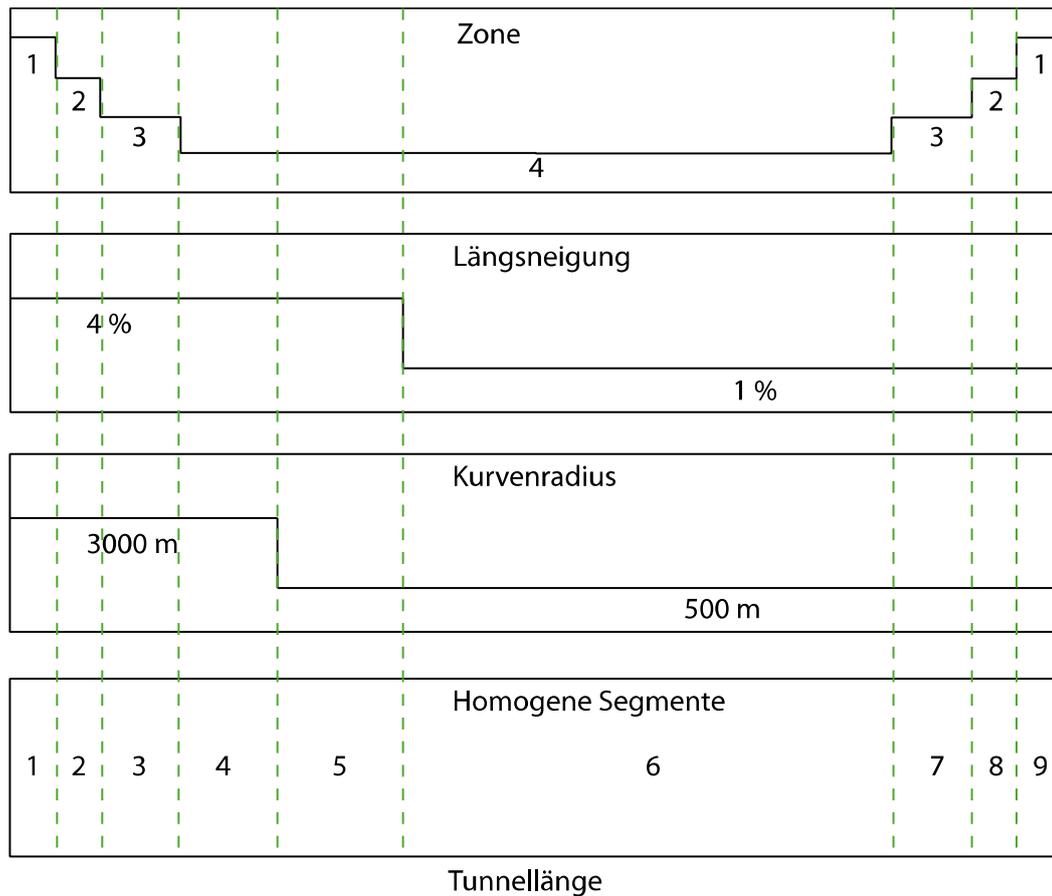


Abb. 3.6 Schematische Darstellung der Ermittlung der Anzahl der homogenen Segmente über die Tunnellänge.

Generell ist die Anzahl an homogenen Segmenten nicht beschränkt und der Detaillierungsgrad in Bezug auf die homogenen Segmente kann beliebig genau ausfallen. Dies macht in der Praxis wenig Sinn, da ab einem gewissen Detaillierungsgrad die feinere Aufteilung keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis hat. Für die meisten Risikoindikatoren lässt sich eine konstante Eigenschaft über eine bestimmte Länge problemlos identifizieren.

Bei den Risikoindikatoren „Kurvenradius“ und „Längsneigung“ ist dies nicht immer der Fall, da diese Werte keine diskreten Wechsel über die Tunnellänge haben.

3.2.5 Tunnelkomponenten

Die meisten Tunnel haben zwei Richtungen, in einer oder mehreren Tunnelröhren oder sie haben verschiedene Röhren mit einem Haupttunnel und abzweigenden Tunneln und bilden somit ein Tunnelnetzwerk. Auch Knotenpunkte mit Über- und Unterführungen kommen vor.

Einige typische Konfigurationen werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

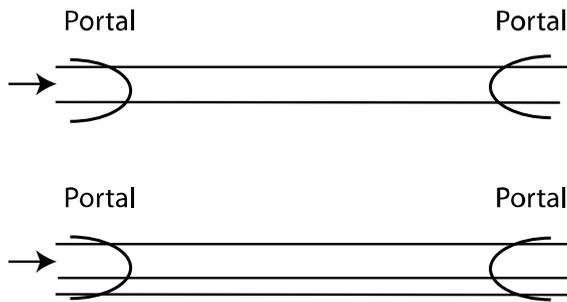


Abb. 3.7 Tunnel mit Richtungsverkehr und einer Fahrspur (1 Komponente im System) sowie ein Tunnel mit Richtungsverkehr, 1 Fahrspur und Standstreifen.

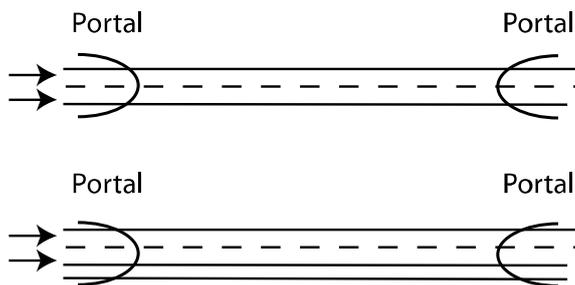


Abb. 3.8 Tunnel mit Richtungsverkehr und 2 (bis 3) Fahrspuren (1 Komponente im System) sowie ein Tunnel mit Richtungsverkehr, 2 Fahrspuren und Standstreifen.

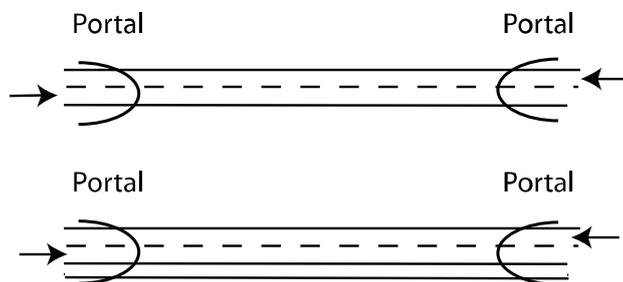


Abb. 3.9 Tunnelsystem einer Röhre im Gegenverkehr und 1 (bis 3) Fahrspur in jeder Richtung (2 Komponenten im System) sowie ein Tunnelsystem einer Röhre im Gegenverkehr und 1 Fahrspur in jeder Richtung und Standstreifen.

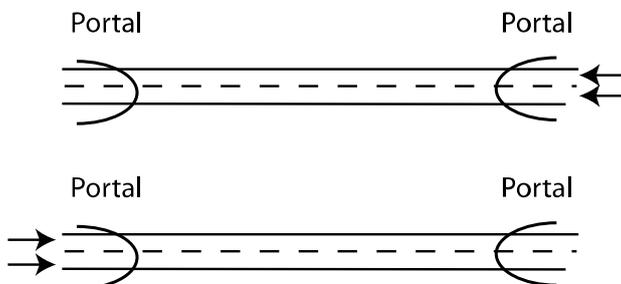


Abb. 3.10 Tunnelsystem mit 2 Richtungen in Richtungsverkehrstunneln mit 1 (bis zu 3) Fahrspur pro Richtung (2 Komponenten im System).

Definitionen von Systemkomponenten

Um die notwendige Flexibilität in Bezug auf die baulichen Charakteristiken von Tunneln zu erhalten wird, jede Richtung getrennt voneinander berechnet und nachträglich die Ergebnisse aggregiert. Um die Ergebnisse aggregieren zu können, muss der Tunnel in exklusive Teilkomponenten aufgeteilt werden.

Eine Komponente

Für Tunnel mit nur einer Richtung besteht das System nur aus einer Komponente (siehe Abb. 3.8 und Abb. 3.9). Die Systembetrachtung erfolgt daher implizit.

Zwei und mehr Komponenten

Für Tunnel mit zwei Richtungen besteht das System aus einem System mit 2 Komponenten; eine Komponente für jede Richtung (z.B. Abb. 3.9 und Abb. 3.10). Für jede Richtung wird die Berechnung separat mit den spezifischen Charakteristiken für jede Richtung durchgeführt (inkl. der spezifischen Verkehrsmengen in jeder Richtung).

Für Tunnel mit Ein- und Ausfahrten oder für Strassennetze von Tunneln sind die einzelnen Komponenten in exklusive Teiltunnel zu unterteilen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die Verkehrsmengen nach Ein- und Ausfahrten ändern. Die Aufteilung in exklusive Teiltunnel (Tunnelkomponenten) ist beispielhaft in Abb. 3.11 dargestellt.

An den Schnittstellen der Tunnelkomponenten muss bezüglich der spezifischen Charakteristiken, wie beispielsweise die Einfahrtbedingungen, beachtet werden, in welcher Komponente diese berücksichtigt werden, um Doppelberechnungen zu vermeiden.

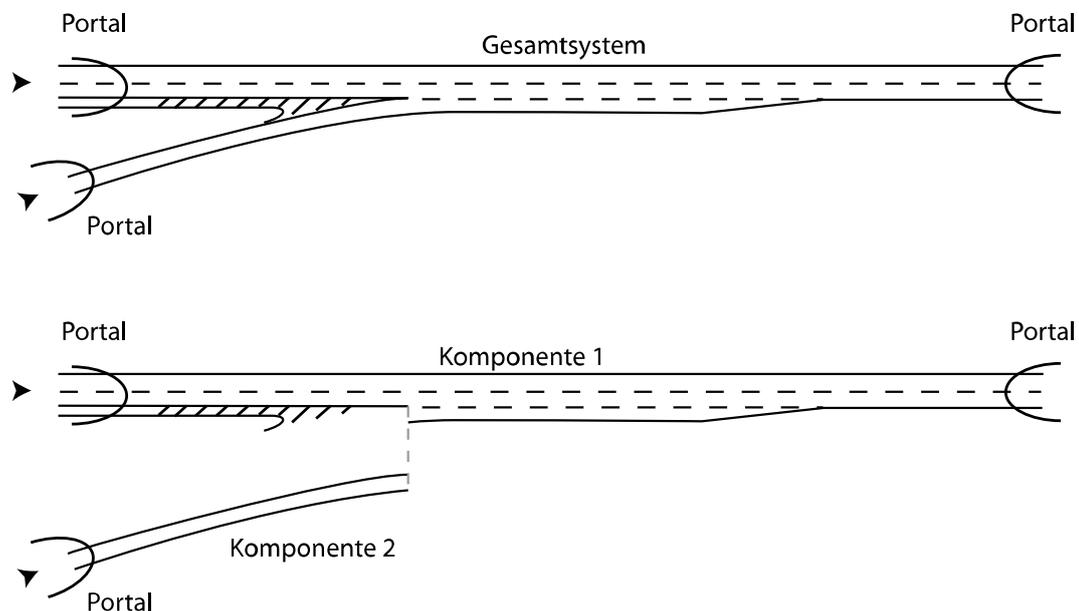


Abb. 3.11 Schematische Darstellung der Aufteilung des Gesamtsystems in Tunnelkomponenten.

Bei Tunnelkomponenten, die nicht in einem Portal enden, ist die Charakterisierung der Zonen entsprechend anzupassen, d.h. es gibt ggf. keine Zonen 1, 2 oder 3 (siehe beispielsweise Komponente 4 in Abb. 3.11).

3.2.6 Tunnelgeometrie

Tunnelprofile und die zugehörigen Bezeichnungen und Abstände, die in der Methodik verwendet werden, sind gemäss Norm SIA 197 [15] und Norm SIA 197-2 [16] definiert.

Vertikale Linienführung

Die vertikale Linienführung entspricht dem Höhenverlauf der Trasse. Berücksichtigt wird der effektive Höhenverlauf auf der Fahrbahn in Trassierungsmittle, der als Längsneigung bezeichnet wird. Die Steigungen werden in Prozent angegeben, d.h. eine Angabe von 3 % Steigung bedeutet, dass pro 100 m in waagrechter Richtung die Höhe um 3 m zunimmt. Steigungen in Fahrtrichtung haben positive, Gefälle negative Vorzeichen. Die Streckenabschnitte in Übergangsbereichen mit veränderlicher Längsneigung bei Kappen und Wannen sind so zu bilden, dass die Werte auf 0.25 % Schritte im Bereich unter |3 %| und auf 0.5 % Schritte im Bereich zwischen |3 %| bis |10 %| gerundet werden.

Horizontale Linienführung

Die horizontale Linienführung entspricht der horizontalen Krümmung der Trassierungsachse, der hier als Kurvenradius bezeichnet wird. Der Kurvenradius wird in Metern angegeben, wobei eine Gerade einem Kurvenradius von unendlich entspricht.

Für die Bildung von homogenen Segmenten im Tunnel gibt es eine Besonderheit. Beim Kurvenradius gibt es zwischen den konstanten Radien die Klothoidenbereiche, die den Übergang von einem Radius in den anderen sicherstellen. Vereinfacht wird hier dieser Bereich mit demselben Radius modelliert wie der Kreisbogen selbst. Die Definition ist schematisch in Abb. 3.12 dargestellt. Der Kurvenradius wird demnach über die Hälfte der gesamten Länge der Krümmung als konstant angenommen. Beim Übergang von einem Kreisbogen in den nächsten ist entsprechend vorzugehen.

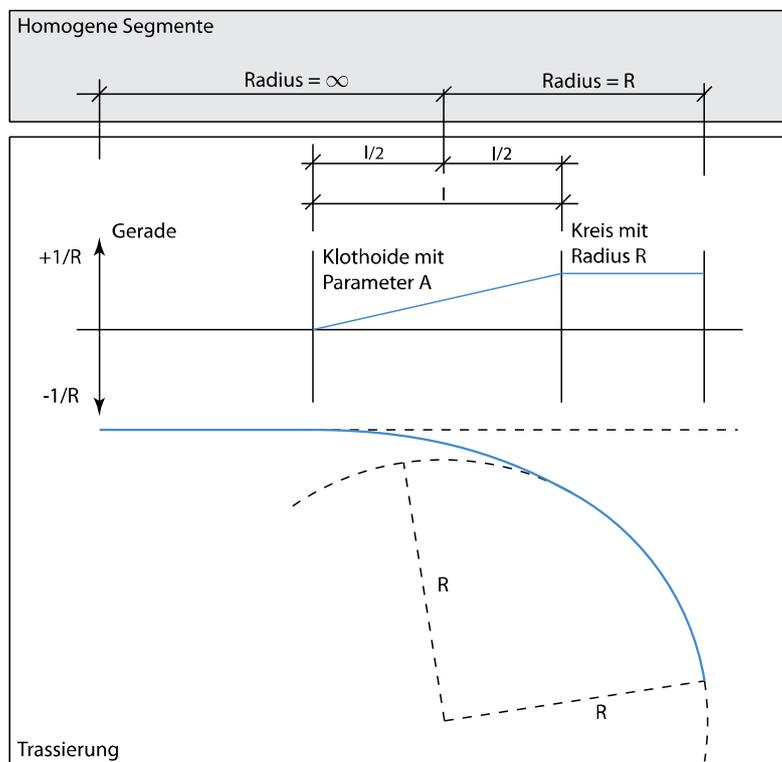


Abb. 3.12 Definition des Kurvenradius bei Klothoiden zur Bestimmung der homogenen Segmente.

Das Vorgehen bei S-Kurven erfolgt analog zu Abb. 3.12. Gibt es bei S-Kurven keinen geraden Streckenabschnitt, dann sind die homogenen Segmente gemäss Abb. 3.13 zu bestimmen.

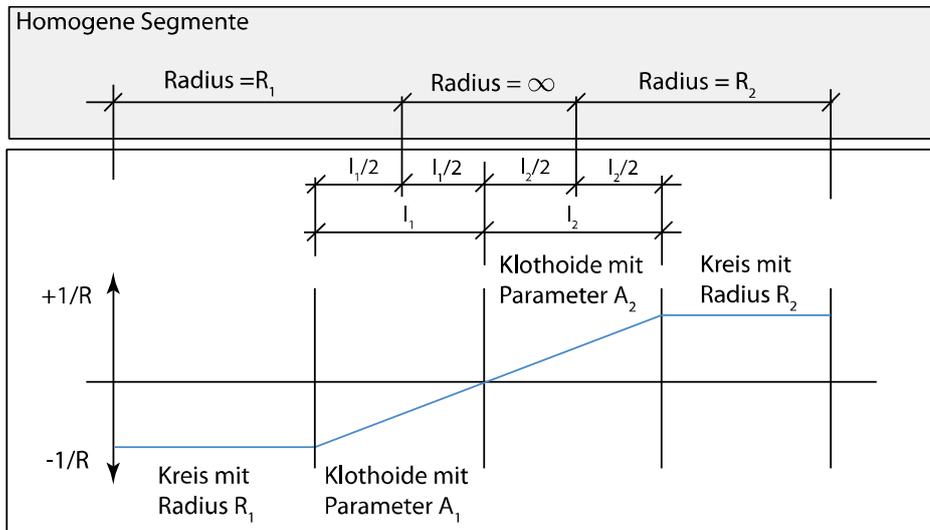


Abb. 3.13 Definition des Kurvenradius bei S-Kurven zur Bestimmung der homogenen Segmente.

Normalprofil

Die Fahrbahn, die Fahrstreifen und die Fahrspuren im Tunnel sind gemäss Abb. 3.14 definiert.

Die Fahrstreifenbreite entspricht dem Abstand zwischen den Mittelpunkten der Fahrbahnmarkierung im Querschnitt. Die Fahrspur entspricht dem Fahrstreifen ohne den Randstreifen. Sie entspricht dem Abstand zwischen den Fahrbahnmarkierungen. Bei 2 oder mehr Fahrstreifen in einer Richtung entspricht die Fahrspurenbreite in der Methodik der geringsten Breite aller Fahrspuren in der betrachteten Richtung.

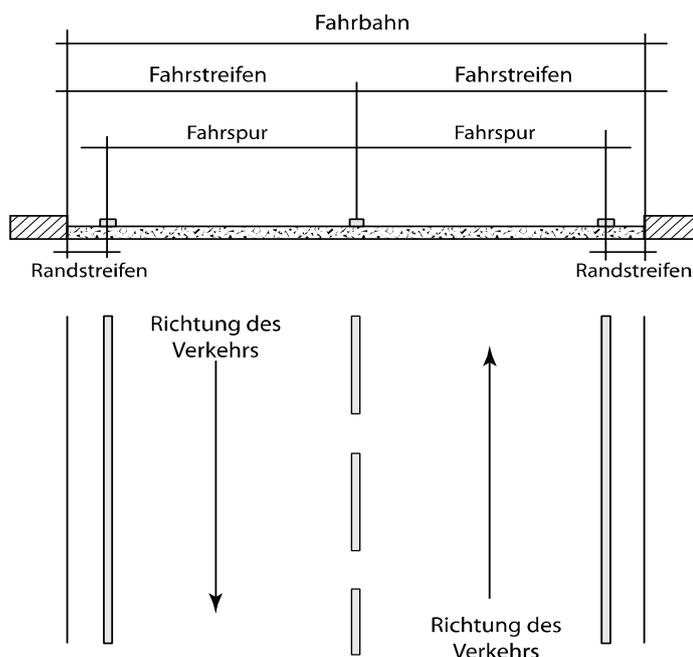


Abb. 3.14 Definition der Fahrbahn, der Fahrspur und der Fahrstreifen im Tunnel.

Für die Querneigung der Strasse wird eine Einseitneigung, wie in Abb. 3.15 dargestellt, berücksichtigt. Dachprofile sind analog zu betrachten.

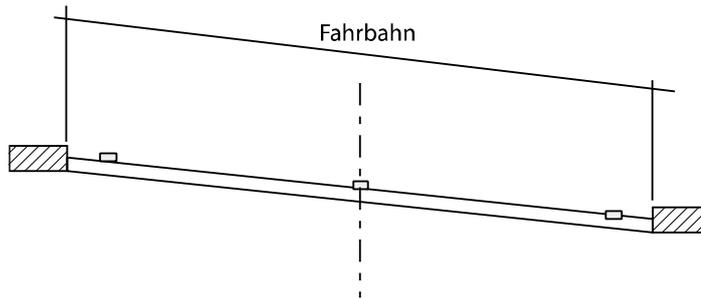


Abb. 3.15 Querneigung im Tunnel.

3.3 Gefahren

Die in der Methodik berücksichtigten Initialereignisse und die berücksichtigten Gefahrenszenarien sind in Abb. 3.16 zusammengestellt.

Abb. 3.16 In der vorliegenden Methodik berücksichtigte Ereignisse.

Initialereignisse	Gefahrenszenarien
Verkehrsunfälle und mechanische / elektrische Überhitzung	Verkehrsunfälle
	Brände infolge Verkehrsunfälle
	Brände durch Selbstentzündung von Fahrzeugen
Gefahrgutereignisse	Lachenbrand
	Explosionen
	Toxische Ereignisse

Andere Gefahren, wie beispielsweise Gefahren aus Naturereignissen, sind nicht in dieser Methodik berücksichtigt und können teilweise gemäss [27] berücksichtigt werden. Für Spezifische Problemstellungen, wie plötzlicher Wassereinbruch, sind mit gesonderten Methodiken projekt- und problemstellungsspezifisch zu behandeln.

3.3.1 Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen

Verkehrsunfälle

In der vorliegenden Methodik werden alle Verkehrsunfälle mit Verletzten berücksichtigt. Hierzu gehören:

- Schleuder- oder Selbstunfall;
- Begegnungsunfall;
- Überholunfall;
- Auffahrunfall;
- Unfall beim Vorbeifahren oder Fahrstreifenwechsel.

Die Definitionen dieser Unfalltypen sind in [45] gegeben und werden wie folgt wiedergegeben:

„Um einen Schleuder- oder Selbstunfall handelt es sich, wenn das Fahrzeug zuerst ins Schleudern gerät, der Fahrer einer drohenden Kollision ausweicht oder durch Selbstverschulden vom Fahrkurs abkommt. Vor dem Schleudern darf sich keine Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer ereignet haben, da sonst andere Unfalltypen massgebend sind.“

„Um einen "Begegnungs-Unfall" handelt es sich, wenn sich entgegenkommende Fahrzeuge kreuzen, ohne dass eines überholt. Um eine "Frontalkollision" handelt es sich, wenn ein Fahrzeug die Gegenfahrbahn benützt (z.B. Kurvenschneiden) und kein anderes Fahrzeug überholen will oder überholt hat.“

„Nur Unfälle aus eigentlichen Überholmanövern werden den "Überhol-Unfällen" zugeordnet. Die Kollision ereignet sich zwischen dem überholenden Fahrzeug mit einem zu überholenden, einem entgegenkommenden oder mit einem nachfolgenden Fahrzeug, das bereits am Überholen ist.“

„Ein "Auffahr-Unfall" ist zutreffend bei einem Aufprall eines Fahrzeuges auf ein fahrendes oder haltendes Fahrzeug, welches den gleichen Fahrstreifen benutzt.“

Diese Unfalltypen werden bisher nicht differenziert in der Methodik betrachtet, sondern zusammengefasst als Verkehrsunfälle mit Verletzten behandelt. Diese Verkehrsunfälle beinhalten auch alle Unfälle mit Bussen und Schwerverkehr.

Das Ereignis Unfall stellt auch ein Initialereignis für einen Teil der Fahrzeugbrände dar.

Die Basisunfallraten im Tunnel werden in Kap. 4.2.2 angegeben.

Ein Brand nach einem Verkehrsunfall (alle Unfälle) passiert in der Grössenordnung von 0.5 % aller Unfälle, d.h. nur in rund einem von 200 Unfällen kommt es zu einem Brandereignis [30]. Dabei ist die Häufigkeit von Bränden bei Schwerverkehrsunfällen ungefähr doppelt so hoch. Diese Abhängigkeiten sind gemäss Kap. 4.2.2 zu berücksichtigen.

Bei den Brandereignissen werden zwei verschiedene Typen unterschieden: Brände infolge von Selbstentzündungen von Fahrzeugen und Brände infolge Verkehrsunfälle. In letzterem Fall ist das Initialereignis ein Verkehrsunfall.

Selbstentzündungen sind zum einen auf elektrische Defekte und Überhitzungen zurückzuführen oder auf eine mechanische Überhitzung von Fahrzeugkomponenten [30]. Beide Ursachen werden getrennt voneinander betrachtet.

Bei Schwerlastfahrzeugen ist eine mechanische Überhitzung deutlich häufiger. Der Einfluss der Längsneigung und des Anteils Schwerverkehr auf die Brandereignisrate ist zu berücksichtigen (Kap. 4.2.2).

3.3.2 Gefahrgutereignisse

Für die Risikoermittlung infolge von Gefahrgutereignissen wird hier als Grundlage das OECD PIARC Standardmodell verwendet [46], wobei die Eintretensraten an die spezifischen Bedingungen in der Schweiz gemäss [24] angepasst wurden.

Es werden insgesamt elf Szenarien betrachtet, die die wesentlichen Risiken infolge der drei Ereignisse abbilden:

- Lachenbrände,
- Explosion und
- Toxizität anhand von Leitstoffen (repräsentative Stoffe für eine Gefahrgutwirkung).

Es wird davon ausgegangen, dass die Leitstoffe durch ein Unfallereignis austreten und zu einem Schaden führen. Die Häufigkeit der Freisetzung wird mit einer Rate pro Fahrzeugkilometer angegeben. Berechnet werden die Anzahl Todesfälle und die Anzahl an Verletzten infolge solcher Ereignisse.

Bei Beschränkung für Gefahrgutrisiken wird das Fehlverhalten von Fahrzeuglenkern berücksichtigt, indem angenommen wird, dass 5% der Gefahrguttransporte die Beschränkung nicht respektiert.

„Lachenbrand“

Das Szenario Lachenbrand durch die Freisetzung von Mineralölprodukten wird als repräsentatives Ereignis angesehen. Normale Fahrzeugbrände von Gefahrguttransporten ohne die Freisetzung von Soffen wird gemäss Kapitel 4.2.2 berücksichtigt.

Die Grösse eines Lachenbrandes ist abhängig von der Grösse der Lache, die sich ausbildet. Diese hängt von der Längsneigung des Tunnels von der Querneigung der Fahrbahn sowie vom vorhandenen Entwässerungssystem ab.

„Explosion“

Die Explosionsereignisse umfassen die Propanereignisse. Das Ereignis, dass nach einem Unfall ein grosser Fackelbrand entsteht, der das Unfallfahrzeug und den Gastank innerhalb kurzer Zeit aufheizt und es so zu einem BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) kommt, wird als repräsentatives Szenario für alle Ereignisse dieser Art angesehen.

„Toxische Ereignisse“

Bei toxischen Ereignissen wird davon ausgegangen, dass eine Freisetzung eine gesundheitliche Schädigung bei Tunnelbenutzern auslösen kann. Diese Gesundheitsgefährdung kann von leichten Verletzungen bis zum Tod reichen. Die Methodik beschreibt das Phänomen von Verletzungen bei gegebener toxischer Konzentration verschiedener toxischer Stoffe, nicht jedoch detailliert die biologischen Prozesse im Körper und die daraus resultierende Schädigung.

4 Risikoermittlung

4.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die Methodik zur Risikoermittlung beschrieben. Das Tunnelsystem wird durch homogene Segmente repräsentiert (Kap. 3.2.4) und die Risikoermittlung erfolgt unter Verwendung von Bayes'schen Netzen (Anhang III). Bayes'sche Netze können als Weiterentwicklung von Ereignisbäumen verstanden werden und können diese vollständig ersetzen. Sie bieten zusätzlich eine deutlich kompaktere und damit transparentere Darstellung und können zusätzlich Abhängigkeiten verschiedener Risikoindikatorvariablen berücksichtigen.

Die Bayes'schen Netze sind ein wesentlicher Bestandteil der Methodik zur Risikoermittlung und erleichtern die Analyse stark. Die Analyse kann prinzipiell unter Berücksichtigung aller Vorgaben der Methodik auch mit anderen Werkzeugen erfolgen.

Generell werden zwei unterschiedliche Netze entwickelt, das Erste dient der Berechnung der Risiken aus dem allgemeinen Verkehrsgeschehen (Abb. 4.1), das Zweite dient der Berechnung von Gefahrgutereignissen (Abb. 4.68).

Das erste Netz enthält vier logische Komponenten, d.h. das Gefährdungsmodell für Unfälle, das Gefährdungsmodell für Brände in Tunneln sowie das Konsequenzenmodell für Unfälle im Tunnel und das Konsequenzenmodell für Brände im Tunnel. Da viele Risikoindikatoren voneinander abhängig sind, und um die Effizienz der Berechnungen zu erhöhen, ergibt es Sinn, die Bayes'schen Netze in einem Netz zu kombinieren und somit nicht über ihre logischen Komponenten zu trennen.

Das zweite Netz enthält das Gefährdungsmodell und das Konsequenzenmodell für Gefahrgutereignisse (Kap. 4.3).

Die Methodik berücksichtigt die folgenden Konsequenzen:

- Verletzte infolge von Unfällen;
- Todesfälle infolge von Unfällen;
- Verletzte infolge von Bränden;
- Todesfälle infolge von Bränden;
- Verletzte infolge von Gefahrgutereignissen;
- Todesfälle infolge von Gefahrgutereignissen.

Mit der Methodik wird die erwartete Anzahl Brände und Unfälle berechnet, aber alle Sachschäden hieraus an der Infrastruktur und Schäden, die infolge einer Sperrung entstehen, werden durch diese Methodik nicht berücksichtigt.

4.2 Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen

In den folgenden Kapiteln wird detailliert beschrieben, wie die Ereignisraten und die Konsequenzen infolge des normalen Verkehrsgeschehens modelliert werden, um das Risiko zu ermitteln.

4.2.1 Risikoermittlung mit Bayes'schen Netzen

Die Risikoermittlung erfolgt unter Verwendung von Bayes'schen Netzen. Das Bays'sche Netz zur Ermittlung der Verkehrsrisiken besitzt 39 Knoten und 58 Kanten (siehe auch Anhang III).

Das Bayes'sche Netz ist in Abb. 4.1 dargestellt, die Beschreibung und Diskretisierung der einzelnen Knoten ist in Abb. 4.2 zusammengestellt. Die Farbgebung im Bayes'schen Netz orientiert sich an den Indikatoren (orange), den Ereignissen und Systemzuständen (gelb) und an den Konsequenzen (blau). Die Basis für die Modellierung sind statistische Daten, Modelle aus der Literatur sowie Experteneinschätzungen. Diese Grundlagen und Modelle werden in den folgenden Kapiteln erklärt.

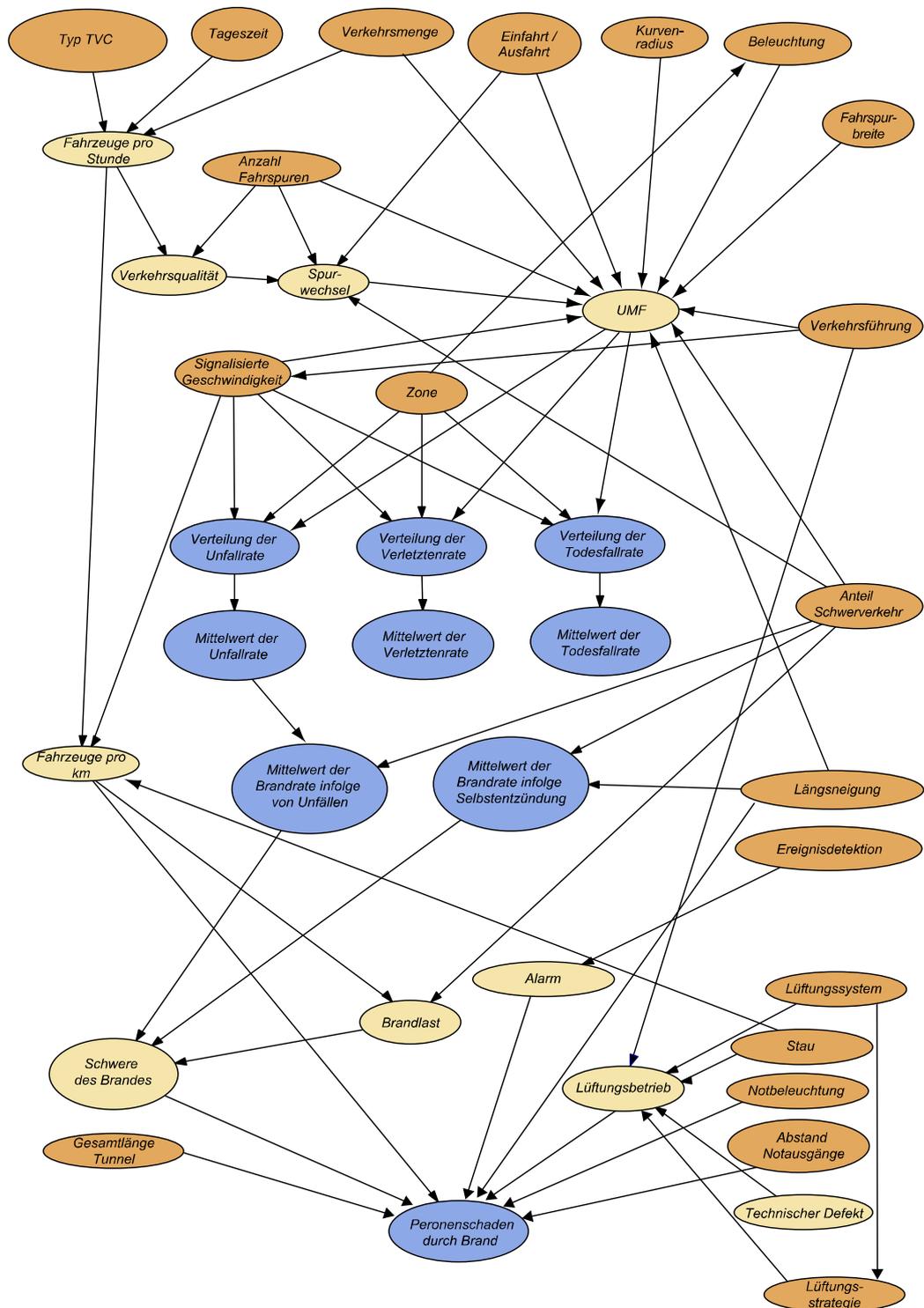


Abb. 4.1 Bayes'sches Netz zur Berechnung der Risiken infolge des allgemeinen Verkehrsgeschehens.

Abb. 4.2 Beschreibung der Knoten im BPN für Unfälle und Brandereignisse.

	Knoten	Beschreibung	Grösse [Zustände x Bedingungen]	Zustände
Verkehr	Typ TVC (Zeitvariationskurve des Verkehrs)	A: ausgeprägte Spitze am Morgen.	6 x 1	Typ A,
		B: Spitze am Morgen kombiniert mit einer kleinen Spitze am Abend.		Typ B,
		C: vergleichsweise gleichverteilter Verkehr während des Tages.		Typ C,
		D: ausgeprägte Spitze am Morgen und am Abend.		Typ D
		E: ausgeprägte Spitze am Abend, kleine Spitze am Morgen.		Typ E
		F: ausgeprägte Spitze am Abend.		Typ F
	Tageszeit	Uhrzeit in Stunden.	24 x 1	1 Uhr, ...,24 Uhr
	Verkehrsmenge	Durchschnittlicher täglicher Verkehr pro Fahrtrichtung.	28 x 1	300, 600, 1'000, ..., 20'000, 25'000, ..., 60'000
	Anteil Schwerverkehr	in [%] am Gesamtverkehr.	21 x 1	1, 2, ..., 18, 20, 24, 26
	Stau		2 x 1	Ja Nein
Geschwindigkeit	Geschwindigkeitsbegrenzung.	9 x 2	40, 50, ..., 120	
Bauwerk	Gesamtlänge Tunnel	Gesamte Länge des Tunnels in [m]	16 x 1	350, 500, 500, 750, 1'000, 1'500, 2'000, 2'500, 5'000, 7'500, 10'000, 12'500, 15'000, 17'500, 20'000, 22'500, 25'000
	Zone	Tunnelzonen definiert durch die Distanz zu den Portalen.	7 x 1	Zone 1 Zone 2 Zone 3 Zone 4 Zone 5 Zone 6 Zone 7
	Einfahrt / Ausfahrt	Label 1: keine Einfahrt / Ausfahrt	41 x 1	1
		Label 2- 41 Verschiedene Kombinationen aus Einfahrt / Ausfahrt und Länge Beschleunigungsstreifen.		2, ..., 41
	Kurvenradius	in [m].	34 x 1	10, 15, 20, ..., 50, 60, ..., 200, 250, ..., 700
	Längsneigung	in [%].	56 x 1	-10, -9.5,...-3,-2.75,...,-0.25, 0,0.25,0.5,... , 3, 3.5, ..., 10
Fahrspurbreite	in [m].	9 x 1	3, 3.25, ...,5	

Abb. 4.2 Beschreibung der Knoten im BPN für Unfälle und Brandereignisse.

	Knoten	Beschreibung	Grösse [Zustände x Bedingungen]	Zustände
	Anzahl Fahrspuren	in Fahrtrichtung.	3 x 1	1, 2, 3
	Verkehrsführung	Type der Verkehrsführung	2 x 1	Richtungsverkehr, Gegenverkehr
	Abstand Notausgänge	Abstand zum nächsten Notausgang in [m].	29 x 1	0,25, 50, 75, 100, 150, 250, 350, 500, 750, 1'000, 1'500, 2'000, 2'500, 3'000, 4'000, ..., 17'000
Nebenanlagen	Beleuchtung	in [cd/m ²]	21 x 7	0,0.5,1,...,10
	Lüftungssystem	Unterscheidet 5 prinzipielle Lüftungssysteme	5 x 1	Natürliche Lüftung
				Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
				Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
				Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
	Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit			
Notbeleuchtung		2 x 1	Ja Nein	
Ereignisdetektion	Ereignisdetektion zur Alarmauslösung	2 x 1	Ja Nein	
Lüftungsstrategie	Beschreibt, welche Lüftungsstrategie gewählt wird.	3 x 5	Strategie für flüssigen Verkehr	
			Strategie für Stau	
			Staudetktion	
Lüftungsbetrieb	Definiert, welcher welche Lüftungsbetrieb gewählt wird.	30 x 120	Gemäss Abb. 4.40	
Verkehr	Fahrzeuge pro Stunde	pro Fahrtrichtung.	20 x 4'320	100, 200, 400, ..., 5000, 6000
	Verkehrsqualität	A: Freier Verkehrsfluss	6 x 81	A
		B: Mässig freier Verkehrsfluss		B
		C: Dichter Verkehr		C
		D: Annähernd stockender Verkehr		D
		E: Stockender Verkehr		E
		F: Stau		F
Fahrspurwechsel	Beschreibt die Häufigkeit von Fahrspurwechseln im Streckenabschnitt.	4 x 6'765	Keine Niedrig Mittel Hoch	

Abb. 4.2 Beschreibung der Knoten im BPN für Unfälle und Brandereignisse.

	Knoten	Beschreibung	Grösse [Zustände x Bedingungen]	Zustände
	Fahrzeuge pro km	Als Einflussgrösse für die Anzahl von Personen im Tunnel und der Brandlast.	8 x 360	10, 20, ..., 70, 100, 120, 180, 220, 250, 300
	UMF	Unfallratenmodifikationsfaktor.	86'045'887'872 x 15'622	0, 0.05, ..., 5, 5.2, ..., 10, 10.5, ..., 20, 22, ..., 30, 35, ..., 175
	Brandlast	Indikator für die vorhandene Brandlast im Tunnel.	4 x 210	Niedrig, Mittel, Hoch, Sehr Hoch.
	Schwere des Brandes	Brandleistung	4 x 16	0 MW 5 MW 30 MW 100 MW
Nebenanlagen	Alarm	Alarmsystem effektiv	2 x 2	Ja Nein
	Technischer Defekt	Technischer Defekt an der technischen Tunnelausrüstung.	2 x 1	Ja Nein
Unfälle	Verteilung der Unfallrate		462 x 6'516	0, 0.005, ..., 2, 2.05, ..., 3, 3.1, ..., 7
	Verteilung der Verletztenrate		462 x 6'516	0, 0.005, ..., 2, 2.05, ..., 3, 3.1, ..., 7
	Verteilung der Todesfallrate		201 x 6'516	0, 0.004, ..., 0.8
	Mittelwert der Unfallrate		2 x 462	0, 1
	Mittelwert der Verletztenrate		2 x 462	0, 1
	Mittelwert der Todesfallrate		2 x 201	0, 1
Brände	Mittelwert der Brandereignisrate infolge Unfall		2 x 42	0, 1
	Mittelwert der Brandereignisrate infolge spontaner Entzündung		2 x 567	0, 1
	Personenschaden durch Brand	Mittelwert.	3 x 6'013'440	Unverletzt, Verletzt, Tot

Die graphische Darstellung des Bayes'schen Netzes hilft, die berücksichtigten Risikoindikatoren, sowie die kausalen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zu erkennen und zu validieren.

Es wird angenommen, dass prinzipiell Informationen zu allen beobachtbaren Indikatoren mit einem gewissen Aufwand verfügbar sind. Sind Informationen nicht verfügbar, so kann die Analyse dennoch durchgeführt werden. In diesem Fall werden (informative) *a-priori* Verteilungen für den jeweiligen Indikator verwendet, die in Anhang I zusammengestellt sind. Je weniger Informationen vorhanden ist, desto unsicherer ist das Ergebnis, es entspricht jedoch dem besten vorhandenen Wissen. Eine Risikobeurteilung sollte nicht ohne jedes Wissen über einen Tunnel durchgeführt werden.

Sobald alle verfügbaren Informationen im Netz berücksichtigt sind, kann das Netz berechnet werden. Beispiele für Rechnungen im BPN sind in Anhang III zusammengestellt und können der Literatur entnommen werden. Die Ergebnisse können direkt aus dem Netz ausgelesen werden.

4.2.2 Unfallrelativzahlen, Unfallmodifikationsfaktoren UMF, Brandmodifikationsfaktoren BMF und Hintergrundraten U_R in Tunneln

Unfallrelativzahlen

In der Methodik werden die Unfallrate, die Verletztenrate, die Todesfallrate sowie die Brandereignisrate verwendet und als Ergebnis der Risikoberechnung angegeben. Diese Unfallrelativzahlen sind generell unabhängig von der Exposition, d.h. von der Fahrleistung auf einem betrachteten Streckenabschnitt. Hier wird der Begriff Streckenabschnitt verwendet, da die Unfallrelativzahlen allgemeingültig sind und sich nicht auf Tunnel oder homogene Segmente beschränken.

Der Erwartungswert der Anzahl Ereignisse, z.B. Verletztenunfälle, Todesfälle, etc. berechnet sich aus der Multiplikation der Rate mit der Exposition. Die Exposition berechnet sich zu:

$$E = v \cdot 365 \cdot l \quad [Fzgkm / a] \quad (2)$$

Wobei l die Länge eines betrachteten Streckenabschnitts ist und v die jahresdurchschnittliche tägliche Verkehrsmenge in der betrachteten Richtung. Werden beide Richtungen betrachtet, so ist v entsprechend anzupassen.

Unter Verwendung von Beobachtungen an Streckenabschnitten können die spezifischen Raten nach Abbildung Abb. 4.3 berechnet werden.

Abb. 4.3 Berechnung der Unfallrelativzahlen.

Unfallrate U _R Unfälle mit Verletzten pro 1 Mio. Fzgkm	$U_r = \frac{\text{Anzahl Unfälle} \times 10^6}{E}$
Verletztenrate V _R Anzahl Verletzte pro 1 Mio. Fzgkm	$V_r = \frac{\text{Anzahl Verletzte} \times 10^6}{E}$
Todesfallrate T _R Anzahl Verletzte pro 1 Mrd. Fzgkm	$T_r = \frac{\text{Anzahl Tote} \times 10^9}{E}$
Brandereignisrate B _R Anzahl Brände pro 1 Mrd. Fzgkm	$B_r = \frac{\text{Anzahl Brände} \times 10^9}{E}$

Unfallmodifikationsfaktoren UMF

Das Konzept der Unfallmodifikationsfaktoren ist eines der Standardverfahren in der Vorhersage von Unfällen. Es wird verwendet, um die Abweichung einer Unfallrate von der normalen Basisrate zu beschreiben. Unfallmodifikationsfaktoren (UMF im englischen auch als accident modification factor AMF oder crash modification factor CMF bezeichnet) werden häufig verwendet um den Einfluss von Änderungen an der Strasseninfrastruktur auf die Unfallhäufigkeit zu modellieren. Dieses Ansatz wird auch hier verwendet.

Aus dem Bayes'schen Netz, welches in Abb. 4.1 dargestellt ist, ist erkennbar, dass der Knoten UMF eine zentrale Rolle im Modell spielt. Der Unfallmodifikationsfaktor (UMF) reflektiert die prozentuale Veränderung der Unfallrate, die erwartet werden kann, wenn einer oder mehrere Indikatoren vom Normalfall abweichen. Die Schwierigkeit liegt darin zu definieren, was als Normalfall zu verstehen ist. Da Unfallstatistiken in der Regel nicht zwischen verschiedenen Risikoindikatoren unterscheiden, kann angenommen werden, dass die Unfallrate in Tunneln den Mittelwert über alle Tunnel in einem Land darstellt. Der Zeitraum, der für die Ermittlung der Unfallrate verwendet wird, darf nicht zu lang sein, da die Entwicklung der Unfallrate zeitvariant ist (siehe auch Kapitel 5.6) und man bei der Ermittlung der Unfallrate in der Regel implizit ein stationäres Verhalten annimmt.

Die mittlere Unfallrate, sowie die mittlere Verletztenrate und mittlere Todesfallrate wird im Folgenden als Hintergrundrate bezeichnet. Diese korrespondiert zum Mittelwert der Unfallrate über alle Tunnel im Verantwortungsbereich des ASTRA.

Der Erwartungswert der Anzahl Unfälle in einem willkürlich gewählten Streckenabschnitt kann unter Verwendung dieser Hintergrundrate berechnet werden, wenn keine weiteren Informationen zu diesem Streckenabschnitt verfügbar sind. Werden zusätzliche Informationen, wie beispielsweise über die Längsneigung im Tunnel verfügbar, so gibt der UMF Informationen über die erwartete Veränderung der Hintergrundrate.

Der UMF ist eine normalisierte Funktion von einem oder mehreren Indikatoren i , d.h. $UMF = f(i_1, \dots, i_n)$ mit einem Definitionsbereich von $[0, \infty]$. Der UMF wird unter Verwendung verschiedener Methodiken und Modellen für die unterschiedlichen Indikatoren entwickelt.

Der Knoten UMF repräsentiert den Unfallmodifikationsfaktor. Dieser Knoten im Netz ist direkt abhängig von 11 Indikatoren. Für alle diese Knoten sind Unfallmodifikationsfaktoren entwickelt worden.

Durch die Verwendung dieser Modelle wird der UMF als Produkt der verschiedenen Einflüsse berechnet. Der Knoten UMF enthält die Verteilung des UMF, d.h. das Resultat ist nicht ein einfacher Faktor, sondern reflektiert die Unsicherheit in der Analyse. Die Unsicherheiten setzen sich aus den Unsicherheiten im Modell als auch aus den epistemischen Unsicherheiten durch fehlendes Wissen in Bezug auf die berücksichtigten Indikatoren zusammen. In Abb. 4.4 ist die Wahrscheinlichkeitsmasse des UMF dargestellt für den Fall, dass keine Information über die Risikoindikatoren vorliegt. Die Streuung ist mit einem Variationskoeffizient von 1.0 relativ gross. Der Mittelwert liegt in diesem Fall bei 1.02.

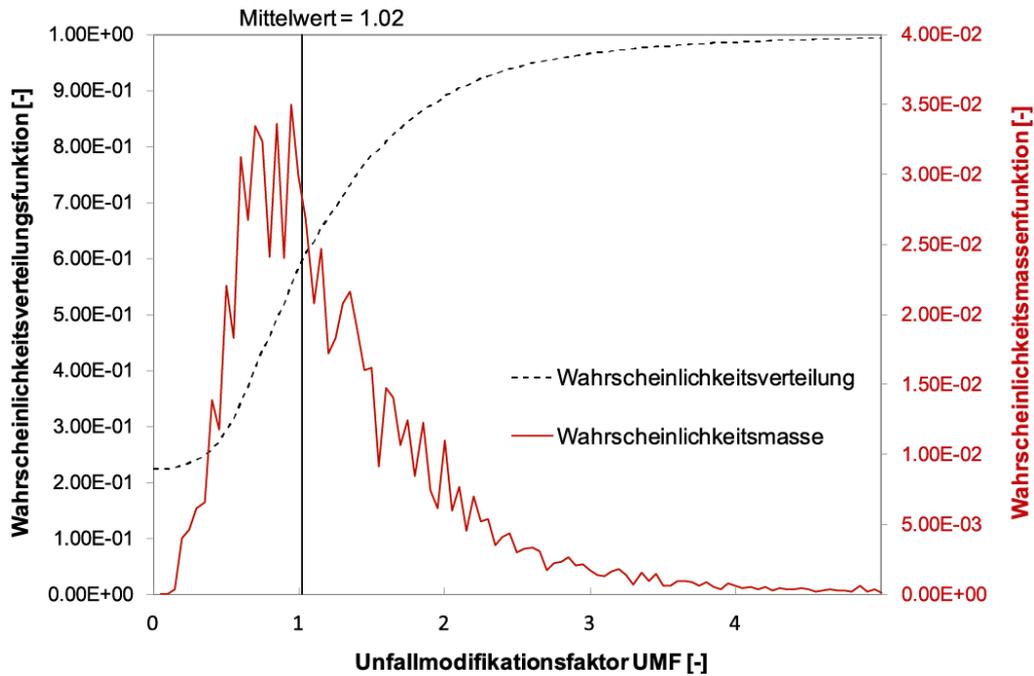


Abb. 4.4 Verteilung des UMF für den Fall, dass keine Informationen über die Indikatoren vorliegen.

Wird nun Information in das System eingefügt, und die Inferenzberechnung im Bayes'schen Netz durchgeführt (siehe Anhang III), so reduziert sich die Unsicherheit. Je nach Informationsstand werden die Unsicherheiten in der Analyse somit vom Bayes'schen Netz konsistent berücksichtigt.

Brandmodifikationsfaktor BMF und Basisbrandereignisraten

Das generelle Konzept des Unfallmodifikationsfaktors kann auch für Brände verwendet werden. Dabei wird die Basisrate in Abhängigkeit der verschiedenen Indikatoren modifiziert, d.h. entweder erhöht oder verringert. Die Art der Modifizierung ist dabei prinzipiell nicht beschränkt und kann auch nichtlinear sein. Es gibt im Bayes'schen Netz (siehe Abb. 4.1) keinen Knoten für den BMF. Dieser wird mit der Brandereignisrate implizit berücksichtigt.

Es gibt zwei prinzipiell verschiedene Szenarien, die zu einem Brand infolge des normalen Verkehrsgeschehens führen. Das eine ist ein Brandereignis nach einem Unfall, das andere ist ein Brandereignis infolge spontaner Entzündung. Für beide könnten viele Unterszenarien gebildet werden und Auslöseereignisse definiert werden. Aufgrund der geringen Datenlage macht eine weitere Auflösung dieser zwei Szenarien wenig Sinn.

Der Statistik von [30] kann entnommen werden, dass die Basisbrandereignisrate bei $4.6 \cdot 10^{-8} [1/veh km]$ liegt und das in etwa 20 % aller Brände infolge von Unfällen auftreten. Die Brandereignisrate, die in [47] für Österreich angegeben wird, ist deutlich geringer und liegt bei etwa $7.1 \cdot 10^{-9} [1/veh km]$ für alle Brände. Damit ergibt sich eine Basisbrandereignisrate von $0.2 \cdot 7.1 \cdot 10^{-9} = 1.44 \cdot 10^{-9} [1/Fzg km]$ für alle Fahrzeuge infolge von Unfällen.

Die Brandereignisrate des Schwerverkehrs nach Unfällen liegt um den Faktor 2 höher als derjenige von Personwagen. Bei einem Anteil des Schwerverkehrs in Österreich von 12 % ergeben sich die Brandraten für den Schwerverkehr und die Personwagen gemäss Abb. 4.5.

Defekte an Fahrzeugen führen häufiger zu Fahrzeugbränden als Unfälle. Die Brandereignisrate infolge spontaner Entzündung beträgt $0.8 \cdot 7.1 \cdot 10^{-9} = 5.68 \cdot 10^{-9}$ [1/Fzg km]. Es wird angenommen, dass die Brandereignisrate des Schwerverkehrs 3.5 mal höher ist als die von Personenwagen. Bei einem mittleren Anteil des Schwerverkehrs von 12 % ergibt sich ein für die Personenwagen und den Schwerverkehr gemäss Abb. 4.5.

Abb. 4.5 Basisbrandraten nach [47] und [30].

Basisbrandrate PW infolge von Unfällen pro Fzg. km	1.2678 10^{-9}
Basisbrandrate Schwerverkehr infolge von Unfällen pro Fzg. km	2.5357 10^{-9}
Basisbrandrate PW infolge von technischen Defekten pro Fzg. km	4.3692 10^{-9}
Basisbrandrate Schwerverkehr infolge von technischen Defekten pro Fzg. km	1.5292 10^{-8}

Hintergrundraten und Unfallraten U_R

Die Hintergrundraten entsprechen den mittleren Unfallraten über das gesamte Tunnelnetzwerk im Verantwortungsbereich des ASTRA. Die Unfallraten sind nicht abhängig von spezifischen Indikatoren (ausgenommen der Zonen). Wenn es möglich wäre, ausreichend Daten zu sammeln, die zu jedem Unfall auch die Ausprägung aller Indikatoren liefern würden, so wäre die Verwendung des Risikoindicators UMF nicht notwendig. Da jedoch fast jeder Tunnel einzigartig in Bezug auf seine spezifischen Charakteristiken ist, ist es nicht möglich, für alle möglichen Kombinationen der Ausprägungen ausreichend Daten zu sammeln. Falls jedoch neue Informationen verfügbar werden, sollten die verwendeten Modelle aktualisiert und ggf. angepasst werden.

Die folgende Definition für die verschiedenen Schweregrade von Unfällen wird gegeben:

- **Getötet:**
„Als getötet sind Personen anzuführen, die an der Unfallstelle ihr Leben verloren oder innert 30 Tagen nach der Kollision an den Unfallfolgen gestorben sind.“ [48].
- **Schwerverletzt:**
„Als schwerverletzt gelten Personen, die schwere sichtbare Beeinträchtigungen aufweisen, welche normale Aktivitäten zu Hause für mindestens 24 Stunden verhindert (z.B. Bewusstlosigkeit oder Knochenbruch [exkl. Fingerbruch] oder Spitalaufenthalt von mehr als 1 Tag).“ [48].
- **Leichtverletzt:**
„Als leichtverletzt gelten Personen mit geringer Beeinträchtigung, mit oberflächlichen Verletzungen ohne nennenswerten Blutverlust oder leicht eingeschränkter Bewegung, die aber das Verlassen der Unfallstelle aus eigener Kraft, erlaubt“ [48].

In der vorliegenden Methodik wird nicht zwischen leicht- und schwerverletzt unterschieden, da die Datengrundlage eine Unterscheidung derzeit nicht ermöglicht.

Als Unfälle werden alle gemeldeten Ereignisse bezeichnet, die einen Schaden an einem oder mehreren Fahrzeugen, oder an der Strasseninfrastruktur zur Folge hatten.

Die Hintergrundraten für Verletztenunfälle wurden unter Verwendung der Daten des ASTRA, Fachbereich Sicherheit aus des Jahren 2005-2009 berechnet. Dabei wurde berücksichtigt, dass es statistisch 1.612 verletzte Personen pro Unfall gibt [49].

Die Unfälle und Unfallraten in Tunneln auf Nationalstrassen in der Schweiz (1992-2008) sind tabellarisch in Abb. 4.6 und grafisch in Abb. 4.7 dargestellt. Die Unfallraten nehmen über die Jahre mit exponentiellem Trend ab. Diese Entwicklung ist konform zu anderen internationalen Statistiken (vgl. IRTAD Datenbank der OECD).

Abb. 4.6 Anzahl Unfälle und Unfallrate (Verletztenunfälle) in Tunneln der Nationalstrasse in der Schweiz.

Jahr	Unfälle	Verletzte	Tote	Verletztenunfälle	Netzlänge Tunnel [km]	DTV	U _R
1992	592	233	7	144	118.4	26660	0.1249
1993	546	213	7	132	119.1	27176	0.1114
1994	538	228	3	141	126.3	27745	0.1101
1995	534	208	9	128	130.4	28289	0.0954
1996	564	234	10	145	133.4	28824	0.1030
1997	525	208	3	128	144.3	29423	0.0829
1998	549	248	9	153	160.8	30067	0.0868
1999	549	288	4	178	169.2	30645	0.0940
2000	531	265	4	164	172.3	31181	0.0835
2001	566	305	7	188	174.0	31705	0.0936
2002	571	321	6	198	192.2	32363	0.0873
2003	495	240	4	148	194.9	32896	0.0633
2004	600	247	3	153	197.2	33425	0.0634
2005	656	251	2	155	204.2	33582	0.0619
2006	555	236	9	146	204.2	33783	0.0579
2007	518	166	4	103	204.2	34839	0.0395
2008	460	171	2	106	212.6	35114	0.0388
2009	571	245	3	151	225.0	36203	0.0509

Die Daten aus der Schweiz enthalten alle Unfälle. Für die Darstellung in Abb. 4.7 wurden die Daten mit einem Faktor von 3.8, der das Verhältnis zwischen allen Unfällen und Verletztenunfällen widerspiegelt [49], transformiert.

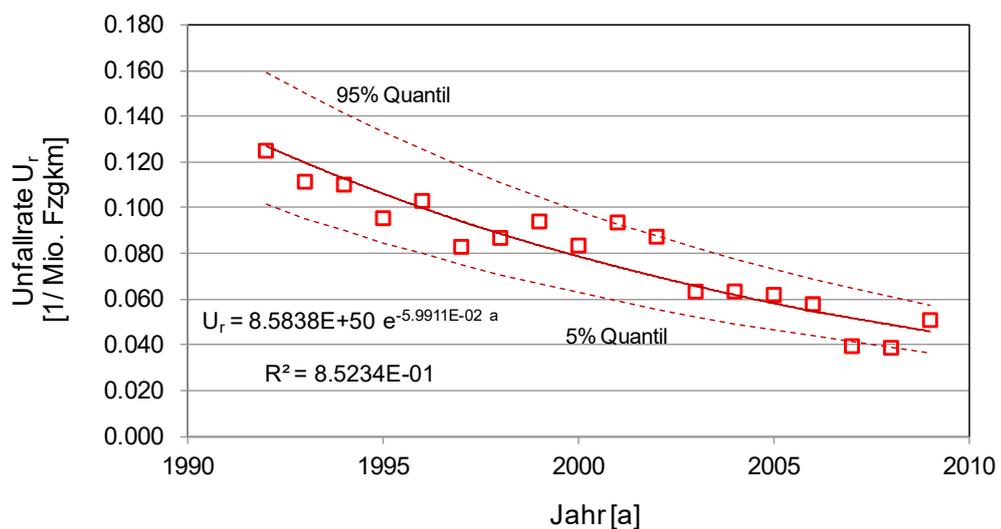


Abb. 4.7 Unfallraten in Tunneln auf Nationalstrassen in der Schweiz (1992-2008) sowie Darstellung der Trendlinie (Verletztenunfälle).

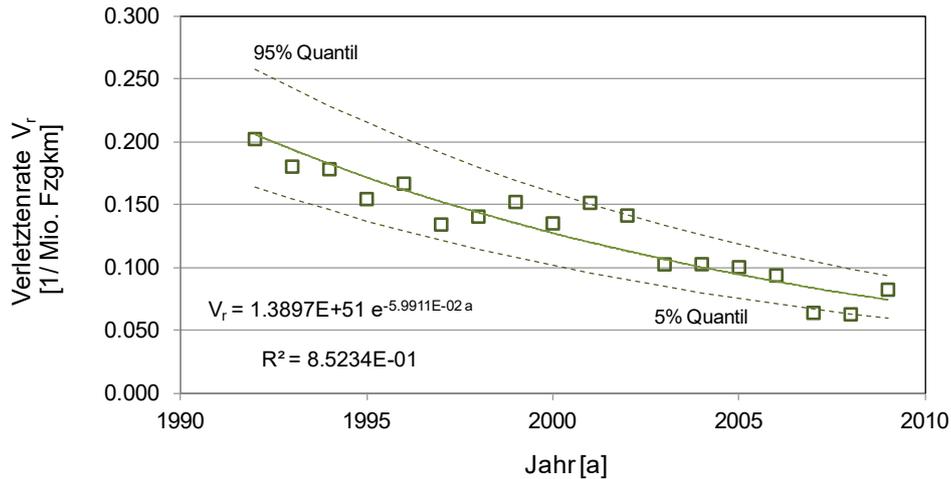


Abb. 4.8 Verletztenrate in Tunneln auf Nationalstrassen in der Schweiz (1992-2008) sowie Darstellung der Trendlinie.

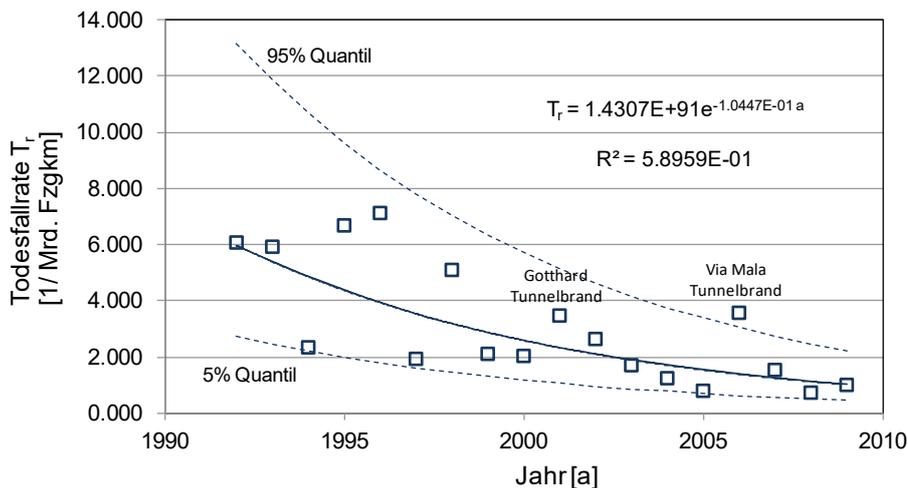


Abb. 4.9 Todesfallrate in Tunneln auf Nationalstrassen in der Schweiz (1992-2008) sowie Darstellung der Trendlinie.

Am 24.10.2001 sind nach einem Unfall bei einem Brand im Gotthardtunnel 11 Personen ums Leben gekommen. Bei dem Unfall selbst ist keine Person getötet worden.

2006 ist ein signifikanter Anstieg der Todesfallrate zu beobachten. Grund für diesen Anstieg ist das Unglück im Via Mala Tunnel am 16.09.2006, bei dem 9 Personen ums Leben kamen. 6 Personen sind durch den Unfall ums Leben gekommen und 3 Personen sind infolge des anschliessenden Brandes getötet worden.

Die Brandopfer der beiden Ereignisse wurden in Abb. 4.9 nicht berücksichtigt.

Generell sind die Unfallraten in Tunneln geringer als auf der offenen Strecke. Gründe hierfür sind konstante Bedingungen im Tunnel und fehlende Umgebungseinflüsse.[50] [51].

Die Basisunfallrate U_r , die Basisverletztenrate V_r und die Basistodesfallrate T_r , die in der Methodik berücksichtigt werden, ergeben sich zu (Basisjahr 2014): (siehe Abb. 4.7):

$$U_r = 0.0340 \quad [1 / \text{Mio} \cdot \text{Fzgkm}] \quad (3)$$

$$V_r = 0.0551 \quad [1 / \text{Mio} \cdot \text{Fzgkm}] \quad (4)$$

$$T_r = 0.6005 \quad [1 / \text{Mrd} \cdot \text{Fzgkm}] \quad (5)$$

Es wurde in [43] und in [47] beobachtet, dass die Unfallraten in den Portalzonen erhöht und in der Mitte des Tunnels etwas geringer als der Durchschnitt sind. Unter Verwendung dieser Daten und einer Kalibrierung an 18 Tunneln mit georeferenzierten Daten aus der Schweiz sind die Unfallraten für die verschiedenen Zonen im Tunnel ermittelt worden. Diese sind in Abb. 4.10 gegeben.

Abb. 4.10 Zusammenstellung der Basisunfallraten.

Typ		Hintergrundrate [Mio. Fzg. km]
Unfallrate	Zone 1	0.11144312
	Zone 2	0.09600389
	Zone 3	0.07406817
	Zone 4	0.03091855
	Zone 5	0.04444409
	Zone 6	0.07200292
	Zone 7	0.08915449
Verletztenrate	Zone 1	0.1872668
	Zone 2	0.14660154
	Zone 3	0.12777156
	Zone 4	0.05005677
	Zone 5	0.07666293
	Zone 6	0.11012021
	Zone 7	0.14981344
Todesfallrate	Zone 1	0.00098646
	Zone 2	0.00063210
	Zone 3	0.00071829
	Zone 4	0.00054590
	Zone 5	0.00043098
	Zone 6	0.00047407
	Zone 7	0.00078916

Die Datengrundlage zeigt, dass in etwa 9-10 % der Verletzten schwerverletzt sind. Diese Unterscheidung wird hier nicht gemacht. Dennoch kann bei Bedarf eine Abschätzung gemäss Abb. 4.11 gemacht werden.

Abb. 4.11 Verhältnis von Schwerverletzten zu Leichtverletzten in den verschiedenen Tunnelzonen.

Zone 1	8.5
Zone 2	9.2
Zone 3	9.5
Zone 4	10
Zone 5	9.5
Zone 6	9.0
Zone 7	8.0

Zukünftige Aktualisierungen der Hintergrundraten

Um der zukünftigen Entwicklung der Ereignisraten Rechnung zu tragen, ist es sinnvoll, diese zu aktualisieren. Dabei kann es vorkommen, dass kein Ereignis in einem Beobachtungszeitraum beobachtet wird. Eine Rate wird jedoch nie den Wert Null annehmen, auch wenn keine Beobachtungen in einem bestimmten Zeitraum auf einer bestimmten Strecke gemacht wurden. Die Unfallrate sollte daher in einem Abstand von 5 Jahren unter Berücksichtigung des Trends aktualisiert werden.

4.2.3 Modellierung der Indikatoren

Wie in Kapitel 2.7.2 beschrieben, werden die Indikatoren verwendet, um eine Vorhersage über die Häufigkeiten von Unfällen, Verletzten, Todesfällen, Bränden und Gefahrgutereignissen zu machen. Im Folgenden werden die Indikatoren beschrieben, die für die Beschreibung von Risiken aus dem normalen Verkehrsgeschehen verwendet werden.

Dabei sind einige der Indikatoren auch für Gefahrgutereignisse relevant. In den folgenden Abschnitten werden die Indikatoren beschrieben, die in Abb. 4.12 zusammengestellt sind. Indikatoren, die nur für Gefahrgutereignisse relevant sind, werden in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

Abb. 4.12 Übersicht über die Indikatoren.

Indikatoren	Verkehr	Zeitvariationskurven
		Tageszeit
		Verkehrsmengen
		Anteil Schwerverkehr
		Stau
		Geschwindigkeit
	Bauwerk	Zonen
		Einfahrt / Ausfahrt
		Kurvenradius
		Längsneigung
		Fahrspurbreite
		Anzahl Fahrspuren
		Verkehrsführung
	Nebenanlagen	Abstand Notausgänge
		Beleuchtung
		Lüftungssystem
		Notbeleuchtung
		Überwachungssysteme

Zeitvariationskurven

Die Verkehrsmenge variiert signifikant im Tagesverlauf und die Unfallraten sind stark abhängig von der Dichte des Verkehrs. Um diese Variation im Tagesverlauf berücksichtigen zu können, werden generalisierte kollektive Typen von Zeitvariationskurven (Ganglinien) verwendet. Sechs verschiedene generelle Typen der Zeitvariationskurven sind von Pinkofski identifiziert worden und werden hier verwendet [53]. Auch wenn die Daten, die in [53] verwendet wurden aus Deutschland stammen, kann die prinzipielle Typisierung auch auf andere Länder übertragen werden. Die Typisierungen können wie folgt angegeben werden:

- Typ A: Ausgeprägte Spitze am Morgen;
- Typ B: Spitze am Morgen mit einer kleinen Spitze am Nachmittag;
- Typ C: Relative Gleichverteilung in den Tagstunden und in den Nachtstunden;
- Typ D: Ausprägte Spitze am Morgen und am Nachmittag;
- Typ E: Spitze am Nachmittag mit einer kleinen Spitze am Morgen;
- Typ F: Ausprägte Spitze am Nachmittag.

In [17] werden andere Bezeichnungen verwendet, die generellen Typen entsprechen sich jedoch wie folgt:

- Fernverkehr mit Pendlern (Typ B)
- Pendler (Typ D)
- Ortsverkehr (Typ E)
- Regionalverkehr (Typ F, Typ A)
- Freizeitverkehr (Typ C)

Abb. 4.1 zeigt die generellen Typen der Zeitvariationskurven.

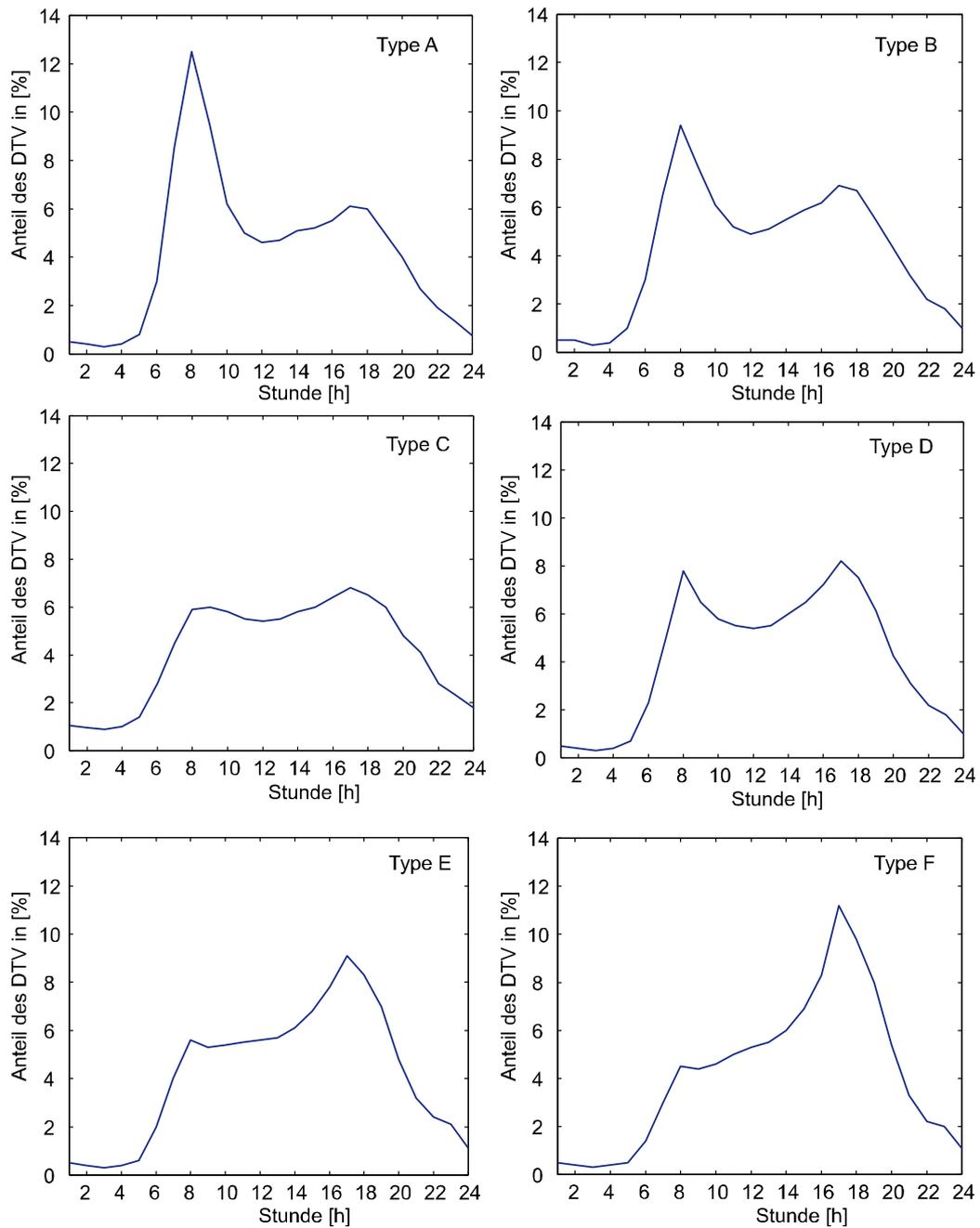


Abb. 4.13 Darstellung der generellen Zeitvariationskurven des Verkehrs nach [53].

Tageszeit

Der Knoten Uhrzeit ist ein logischer Knoten, der benötigt wird, um die Verteilung der Fahrzeuge pro Stunde zu berechnen. Ist es für die Entscheidungsfindung relevant, so könnte unter Verwendung dieses Knotens prinzipiell auch eine Risikobeurteilung für bestimmte Stunden am Tag vorgenommen werden. Dies ist in der Netzarchitektur des Bayes'schen Netzes bisher noch nicht vorgesehen und würde kleinere Modifikationen erfordern.

Verkehrsmenge

In [42] wurde der Einfluss der Verkehrsmenge auf die Unfallrate untersucht und eine Regressionsanalyse zwischen den Unfallraten und Todesfallraten und der Verkehrsmenge durchgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass ein Anstieg der Verkehrsmenge zu geringeren Unfallraten führt. Dabei ist zu beachten, dass in der Regel ein höheres Verkehrsaufkommen sich auch im Entwurf der Infrastruktur widerspiegelt und Tunnel, die ein höheres Verkehrsaufkommen aufweisen, auch besser ausgestattet sind (z.B. in Bezug auf die Beleuchtung und Verkehrsführung).

Dichter Verkehr kann zu einer Zunahme von Verkehrsunfällen führen, insbesondere bei sehr langsamen Verkehr und Stau, durch wechselnde Geschwindigkeiten und von häufigem Fahrstreifenwechsel. Bei stockendem Verkehr und relativ hohen Geschwindigkeiten und hoher Verkehrsdichte ist das Unfallrisiko erhöht und Unfälle mit hohen Konsequenzen sind nicht ausgeschlossen. Nimmt die Verkehrsmenge weiter zu, so sinkt die Geschwindigkeit und das Unfallrisiko nimmt wieder ab. Dies kann durch Beobachtungen von Unfällen im Gubristtunnel bestätigt werden (Datengrundlage 1981-2011). Abb. 4.14 zeigt den Anteil an Unfällen in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge. Der dort ersichtliche Trend nach oben bei steigender Anzahl Fahrzeuge ist stark bedingt durch die Anzahl Fahrzeuge. Der Abfall des Anteils an Unfällen bei einer Verkehrsmenge von mehr als 3000 Fahrzeugen pro Stunde ist deutlich erkennbar.

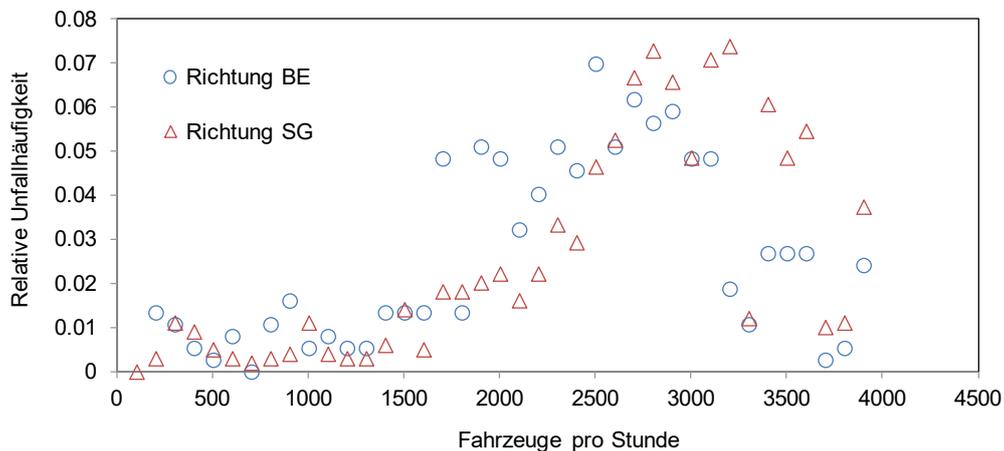


Abb. 4.14 Anteil der Gesamtanzahl an Unfällen in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge.

Durch Bereinigung der Daten mit der Exposition und der Kenntnis der mittleren Unfallrate kann der Unfallmodifikationsfaktor UMF berechnet werden. In Abb. 4.15 ist der beobachtete UMF für die unterschiedlichen Verkehrsmengen dargestellt. Bei einer sehr geringen Verkehrsmengen ist der UMF relativ hoch. Das kann darin begründet sein, dass die Verkehrsteilnehmer bei geringer Verkehrsmenge weniger konzentriert sind. Zudem sind im Gubristtunnel geringe Verkehrsmengen nur in der Nacht vorhanden, wo die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer geringer sein könnte. Da hier nur Daten von einem Tunnel vorliegen und im Bereich geringer Verkehrsmengen andere Einflussfaktoren als die Verkehrsmenge die Unfallhäufigkeit beeinflussen könnte, wird das Modell im unteren Bereich auf einen Faktor von 1.7 beschränkt.

Der UMF steigt ab 3'000 Fahrzeuge pro Stunde wieder an und erreicht bei etwa 5'000 Fahrzeugen pro Stunde sein Maximum. Danach nimmt der UMF wieder stark ab.

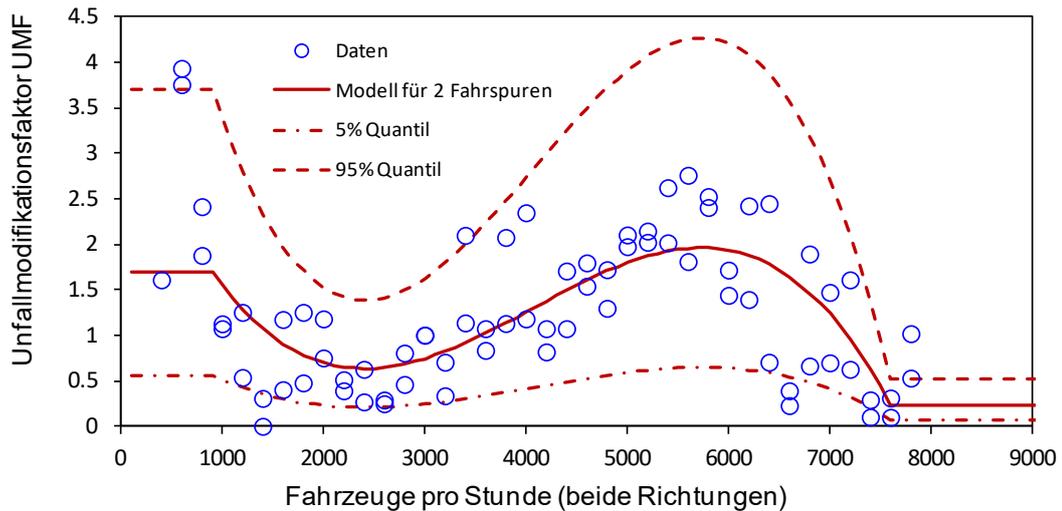


Abb. 4.15 Unfallmodifikationsfaktor im Gubrist aus Daten von 1981-2011 in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge Fahrzeuge pro Stunde sowie das angepasste Modell.

In Abb. 4.15 ist neben den beobachteten Daten auch das daraus entwickelte Modell dargestellt.

Ein Modell zur Berücksichtigung der Verkehrsmenge muss auch die Anzahl Fahrspuren berücksichtigen, da die Kapazität der Strasse für den Verlauf des UMF mitverantwortlich ist. Das Modell aus Abb. 4.15 wurde erweitert, indem der Verlauf über das Verhältnis der unterschiedlichen Kapazitäten skaliert wurde.

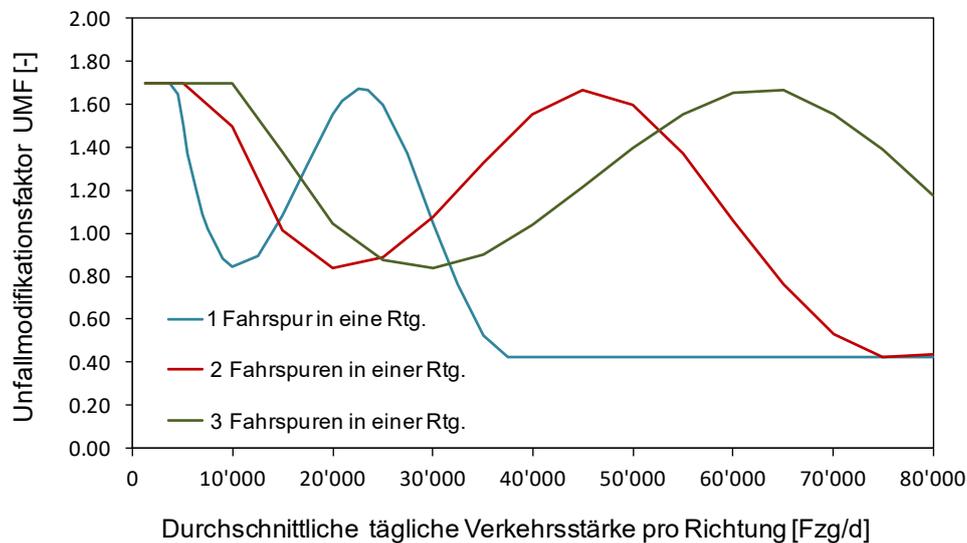


Abb. 4.16 Modell zur Berücksichtigung des Einflusses der Verkehrsmenge auf den UMF.

Der gemeinsame Einfluss dieser beiden Risikoindikatoren im Bayes'schen Netz (Abb. 4.1) ist in Abb. 4.16 dargestellt. Die Gleichungen dieses Einflusses werden im Folgenden dargestellt. Dabei ist die Verkehrsmenge pro Richtung mit ρ [Fzg/d] bezeichnet:

$$AMF_{1Fahrspur} = \begin{cases} 1.7 & \rho < 4'500 \\ 1.8698 \cdot 10^{-27} \cdot \rho^6 + 1.38 \cdot 10^{-22} \cdot \rho^5 + 9.4556 \cdot 10^{-19} \cdot \rho^4 \\ -1.4165 \cdot 10^{-12} \cdot \rho^3 + 5.8739 \cdot 10^{-8} \cdot \rho^2 & 4'500 \leq \rho < 36'000 \\ -7.6787 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 4.0317 & \\ 0.425 & \rho \geq 36'000 \end{cases} \quad (6)$$

$$AMF_{2Fahrspuren} = \begin{cases} 1.7 & \rho < 8'805 \\ -5.66413 \cdot 10^{-28} \cdot \rho^6 + 1.493861 \cdot 10^{-22} \cdot \rho^5 \\ -1.366592 \cdot 10^{-17} \cdot \rho^4 + 4.574174 \cdot 10^{-13} \cdot \rho^3 & 8'805 \leq \rho < 73'788 \\ -4.552394 \cdot 10^{-11} \cdot \rho^2 - 2.2753 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 3.465948 & \\ 0.425 & \rho \geq 73'788 \end{cases} \quad (7)$$

$$AMF_{3Fahrspuren} = \begin{cases} 1.7 & \rho < 12'092 \\ -9.240415 \cdot 10^{-29} \cdot \rho^6 + 3.125772 \cdot 10^{-23} \cdot \rho^5 \\ -3.807375 \cdot 10^{-18} \cdot \rho^4 + 1.731914 \cdot 10^{-13} \cdot \rho^3 & 12'092 \leq \rho < 90'808 \\ -2.664254 \cdot 10^{-11} \cdot \rho^2 - 1.628205 \cdot 10^{-4} \cdot \rho + 3.440151 & \\ 0.425 & \rho \geq 90'808 \end{cases} \quad (8)$$

Anteil Schwerverkehr in Tunneln

In Studien wurde beobachtet, dass der Schwerverkehr, verglichen mit dem Personenverkehr, eine erhöhte Unfallrate erzeugt (siehe [54], [55] und [29]). Die Daten zeigen, dass die Unfallhäufigkeit generell beim Schwerverkehr in der Grössenordnung von 40-50 % erhöht ist.

Betrachtet man die Daten der Strassenverkehrszählung¹ von 2005 (SSVZ 2005), so liegt der Anteil Schwerverkehr gemittelt über alle Zählstellen bei etwa 6 % (Standardabweichung von 3.2 %). Betrachtet man nur die Zählstellen des Nationalstrassennetzes, so liegt der Anteil Schwerverkehr im Mittel mit 8.3 % etwas darüber (Standardabweichung von 3.9 %). Die Daten aus [50] zeigen einen etwas höheren Anteil von im Mittel 10 %. Dies liegt vermutlich daran, dass die Tunnel aus dieser Studie eher auf Transit- und Versorgungsstrecken liegen, die dadurch einen höheren Anteil aufweisen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen für diese 3 Fälle ist in Abb. 4.17 dargestellt.

¹ Daten der Strassenverkehrszählung sind online verfügbar unter:
http://www.portal-stat.admin.ch/ssvz/files/index_de.html
 Last accessed: 30.05.2012

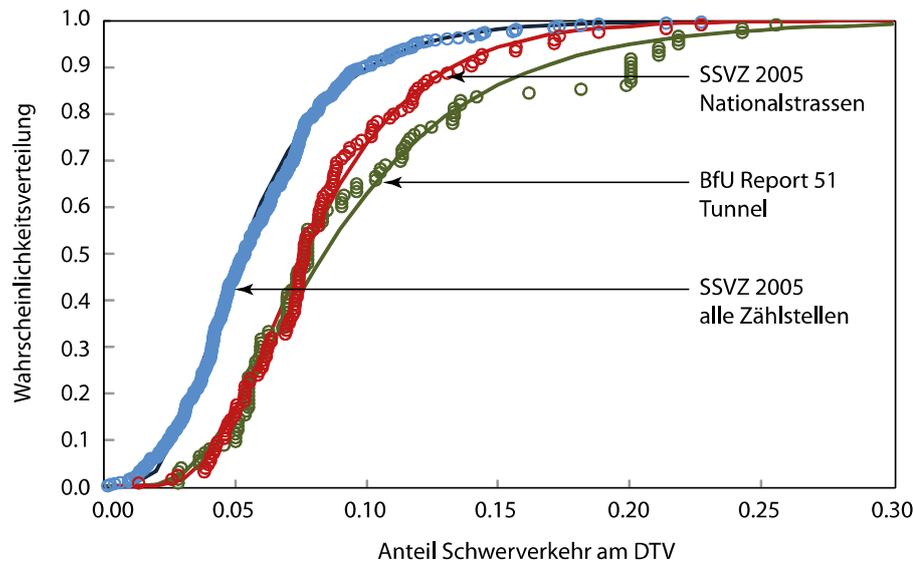


Abb. 4.17 Wahrscheinlichkeitsverteilung des Anteil Schwerverkehrs in der Schweiz.

Aus dem Anteil von 8.3 % Schwerverkehr und der Annahme einer linearen Beziehung zwischen Anteil Schwerlastverkehr und Unfallmodifikationsfaktor, ergibt sich die folgende Funktion in Abhängigkeit des Anteils Schwerverkehr (HGV):

$$UMF = 0.436 \cdot (HGV [\%] / 100) + 0.964 \quad (9)$$

Es kann in den internationalen Statistiken beobachtet werden, dass Gefahrguttransporte eine geringere Unfallrate aufweisen als der normale Schwerverkehr [54] [55]. Der Grund hierfür kann in der besonderen Ausbildung der Fahrer und der erhöhten Aufmerksamkeit beim Transport der Gefahrgüter liegen. Unfälle mit Gefahrgütern können sehr grosse Konsequenzen haben. Die Modellierung von Gefahrguttransporten wird in Kap. 4.3 beschrieben.

Der Transport von Gefahrgütern wird über eine Europäische Vereinbarung geregelt, die als ADR bekannt ist (*Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route*). Die dort gestellten Anforderungen sind unabhängig von dieser Methodik zu erfüllen.

Bei Unfällen mit Reisecars ist häufig eine grosse Anzahl an Personen betroffen. Ein spezifisches Modell, das dies berücksichtigt, ist nicht vorhanden. Reisecars sind nicht explizit im Modell enthalten. Sie sind jedoch implizit berücksichtigt durch die Basisverletztenraten und Basistodesfallraten, in denen auch die Unfälle von Reisecars berücksichtigt sind. Eine spezifische Berücksichtigung in der Methodik ist nicht notwendig, da alle Massnahmen auch einen Einfluss auf die Sicherheit für Cars haben und eine spezifische Ausweisung des Risikos für Cars in der Methodik nicht vorgesehen ist.

Stau

Die Fähigkeit eines Lüftungssystems, sichere Bedingungen über ein gewisses Zeitfenster für die Selbstrettung aufrecht zu erhalten, ist insbesondere in Gegenverkehrstunneln sowie beim Stau in Richtungsverkehrstunneln von grosser Bedeutung.

Bei Stauereignissen ist auch die Anzahl an Personen im Tunnel, die potentiell zu Schaden kommen können, deutlich höher als im normalen Verkehrsfluss.

Die Reduzierung von der Stauwahrscheinlichkeit im Tunnel kann eine risikoreduzierende Massnahme sein. Eine solche Massnahme wurde erfolgreich am Gotthard-Tunnel eingesetzt.

Signalisierte Geschwindigkeit

Die signalisierte Geschwindigkeit ist ein Schlüsselindikator für die Verkehrssicherheit. Die signalisierte Geschwindigkeit hat einen signifikanten Effekt auf die Unfallrate, die Verletztenrate und die Todesfallrate.

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Unfallrate wird mit Bezug auf die Fahrspurbreite und mit Bezug auf den Kurvenradius berücksichtigt.

Modelle, die den Einfluss der signalisierten Geschwindigkeit auf die Unfallrate, Verletztenrate und die Todesfallrate abbilden, sind von Nilsson [56] entwickelt worden und von der OECD publiziert worden. Das Modell von Nilsson ist in Abb. 4.18 gegeben und wird auch vom BfU [57] vorgeschlagen.

Die Erkenntnisse aus [56] sind auch durch Studien von Elvik [58] bestätigt worden, die unabhängig durchgeführt wurden. Die Potenzmodelle von Elvik sind spezifisch für die Bedingungen in Norwegen entwickelt worden.

An Daten aus Österreich kann derselbe Trend beobachtet werden [49]. Dort ist die Steigung jedoch nicht ganz so stark ausgeprägt, so dass es sein kann, dass das Risiko mit dem Modell von Elvik leicht überschätzt wird. Das Modell von Elvik ist in Abb. 4.19 gegeben.

Bis keine anderen gesicherten Ergebnisse aus der Schweiz vorliegen, wird das Modell von Nilsson verwendet. Da beide Modelle nahezu dieselben Ergebnisse liefern, hat die Wahl des Modells kaum einen Einfluss auf das Resultat.

Die Referenzgeschwindigkeit in Schweizer Tunneln wird mit 90 km/h festgelegt, d.h. die Basisunfallrate basiert auf einer mittleren Geschwindigkeit von 90 km/h. Tunnel mit einer Geschwindigkeit unter 90 km/h haben eine geringere Unfallrate und Tunnel mit einer höheren Geschwindigkeit eine höhere Unfallrate.

Abb. 4.18 Beziehung zwischen Verkehrssicherheit und Geschwindigkeit nach Nilsson [56].

Unfälle (y)	Betroffene (z)
Todesfallunfälle	Todesfälle
$y_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_1} y_0$	$z_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_1} y_0 + \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{2 \cdot x_1} (z_0 - y_0)$
Todesfall- und Schwerverletztenunfälle	Todesfälle und Schwerverletzte
$y_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_2} y_0$	$z_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_2} y_0 + \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{2 \cdot x_2} (z_0 - y_0)$
Alle Verletztenunfälle	Alle Verletzten (inkl. Todesfälle)
$y_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_3} y_0$	$z_1 = \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{x_3} y_0 + \left(\frac{v_1}{v_{ref}} \right)^{2 \cdot x_3} (z_0 - y_0)$
Mit	
v_{ref}	Referenzgeschwindigkeit [km/h]
v_1	Geschwindigkeit [km/h]
y_0	Erwartete Anzahl von Todesfallunfällen/Todesfall und Schwerverletztenunfälle/alle Verletztenunfälle bei v_{ref}
y_1	Erwartete Anzahl Unfälle bei v_1
z_0	Erwartete Anzahl an Todesfällen/Todesfällen und Schwerverletzten/alle Verletztenunfälle bei v_{ref}
z_1	Erwartete Anzahl an Todesfällen/Todesfällen und Schwerverletzten/alle Verletztenunfälle bei v_1
x_1, x_2, x_3	Modellparameter mit $x_1 = 4.0$, $x_2 = 3.0$ und $x_3 = 2.0$

Abb. 4.19 Beziehung zwischen Verkehrssicherheit und Geschwindigkeit nach Elvik [58].

Todesfälle	$(S11/S01) = \left(v_1/v_{ref} \right)^{x_1}$		
Verletzte	$(S12/S02) = \left(v_1/v_{ref} \right)^{x_2}$		
Verletztenunfälle	$(S13/S03) = \left(v_1/v_{ref} \right)^{x_3}$		
Mit			
v_{ref}	Referenzgeschwindigkeit [km/h]		
v_1	Geschwindigkeit [km/h]		
S01	Todesfallrate bei Referenzgeschwindigkeit		
S11	Todesfallrate bei Geschwindigkeit		
S02	Verletztenrate bei Referenzgeschwindigkeit		
S12	Verletztenrate bei Geschwindigkeit		
S03	Unfallrate bei Referenzgeschwindigkeit		
S13	Unfallrate bei Geschwindigkeit		
Model	Modellparameter		
	Todesfälle	Verletzte	Verletztenunfälle
	x_1	x_2	x_3
Elvik Typ I	4.5	2.7	2.0

Die Modelle von Elvik und Nilsson beziehen sich auf die aktuell gefahrene Geschwindigkeit auf einem Streckenabschnitt.

Die Daten aus [59] zeigen, dass in der Schweiz das Verhältnis zwischen der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit und der signalisierten Geschwindigkeit nicht weit auseinanderliegen und die Modellierung unter Verwendung der signalisierten Geschwindigkeit eine gute Approximation ist. Studien von Erath und Föhlich [60] in der Schweiz auf Autobahnen und Nationalstrassen haben gezeigt, dass die mittlere Fahrgeschwindigkeit das 0.96-fache der signalisierten Geschwindigkeit ist mit einem Variationskoeffizient von 0.11. Die signalisierte Geschwindigkeit kann generell leichter ermittelt werden als die Fahrgeschwindigkeit.

Ist die mittlere Fahrgeschwindigkeit in einem Tunnel bekannt, so kann diese auch verwendet werden. Hierfür wird die mittlere Fahrgeschwindigkeit in eine äquivalente signalisierte Geschwindigkeit umgerechnet. Diese ist in Abb. 4.20 gegeben. Es wird deutlich, dass der Unterschied zwischen signalisierter Geschwindigkeit und mittlerer Geschwindigkeit nur einen Einfluss hat, wenn der Variationskoeffizient gross ist.

Abb. 4.20 Äquivalente signalisierte Geschwindigkeiten bei bekannter Fahrgeschwindigkeit.

Mittlere Geschwindigkeit (km/h)	Variationskoeffizient				
	5%	10%	15%	20%	25%
	Äquivalente signalisierte Geschwindigkeit				
38.0	40	40	40	40	40
47.5	50	50	50	50	50
57.0	60	60	60	60	60
66.5	70	70	70	70	70
76.0	80	80	80	80	80
85.5	90	90	90	90	100
95.0	100	100	100	100	110
104.5	110	110	110	120	130
114.0	120	120	120	130	140

Zonen

Innerhalb des Tunnels werden verschiedene Zonen in Abhängigkeit ihrer örtlichen Lage berücksichtigt. Diese Zonen entsprechen dem Portalbereich, dem mittleren Bereich im Tunnel sowie dem Ausfahrtsportalbereichen. Die Zonen sind in Kapitel 3.1.2 definiert und der Einfluss auf die Unfallraten in Kapitel 4.2.2 dargestellt.

Einfahrt- und Ausfahrtbedingungen

Ein- und Ausfahrten in Tunnel sind relativ selten, und statistisch signifikante Datengrundlagen für die Berücksichtigung der Gefahren bestehen international nicht. Dennoch sind Ein- und Ausfahrten in bestehenden Tunneln vorhanden und auch bei Neubauten nicht immer vermeidbar. Es können generell fünf verschiedene Typen von Ein- und Ausfahrtsbedingungen unterschieden werden. Diese sind in Abb. 4.21 gegeben.

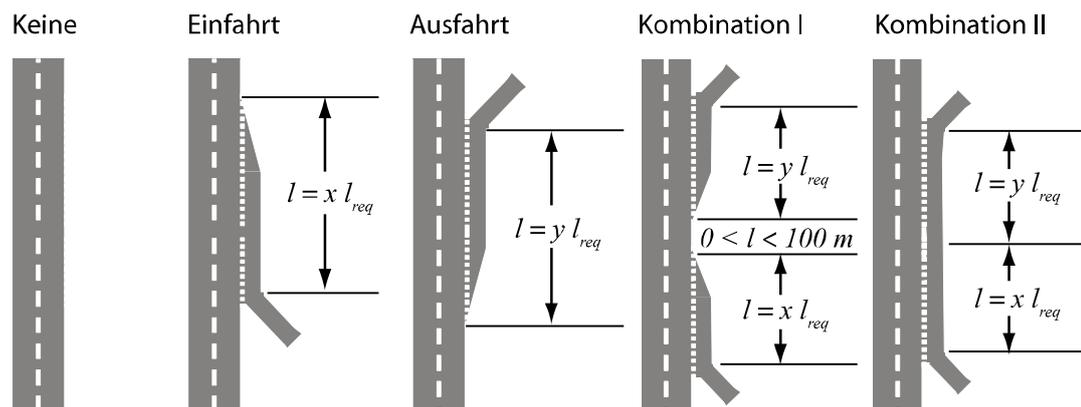


Abb. 4.21 Fünf Typen von Ein- und Ausfahrtsbedingungen.

In Abb. 4.21 bezeichnet l die Länge der Ein- bzw. Ausfahrtsbereichs, l_{req} die normenkonforme Länge der Ein- bzw. Ausfahrtsbereiche und x und y Skalierungen der Ein- und Ausfahrtslängen.

Das Model wurde auf Basis von Expertenschätzungen erstellt [33]. Die Expertenschätzung wurde aufgrund von Relativüberlegungen konsolidiert. So wurde geschätzt, dass das Risiko für Unfälle an Einfahrten dreimal höher ist als an Ausfahrten. In kombinierten Ein- und Ausfahrbereichen mit einem Abstand von weniger als 100 m sind die Unfallraten in etwa sechsmal höher (Kombination I in Abb. 4.21) und ohne Trennung der Ein- und Ausfahrtbereiche in etwa 10-mal höher (Kombination II in Abb. 4.21).

Ein weiterer Aspekt sind die Ein- und Ausfahrtslängen, die in der SN 640 261 [18] geregelt sind. Trotzdem sind in bestehenden Tunneln diese Anforderungen nicht immer erfüllt. Eine erste Kategorisierung wurde vorgenommen, um unterschiedliche vorhandene Längen l_{pres} berücksichtigen zu können: $l_{pres} = 0 \cdot l_{req}$, $l_{pres} = 0.5 \cdot l_{req}$, $l_{pres} = 1 \cdot l_{req}$, $l_{pres} = 2 \cdot l_{req}$.

Hieraus ergeben sich 41 verschiedene Kombinationen aus Ein- und Ausfahrtsbedingungen. Diese sind zusammen mit den Unfallmodifikationsfaktoren in Abb. 4.22 zusammengestellt.

Die Faktoren in Abb. 4.22 berücksichtigen die komplexere Verkehrssituation an Ein- und Ausfahrtsbereichen. Sie berücksichtigen nicht das erhöhte Risiko infolge von Fahrspurwechseln.

Abb. 4.22 UMF für verschiedene Kombinationen von Ein- und Ausfahrten.

	Länge der Einfahrt	Länge der Ausfahrt	UMF
Keine Einfahrt/Ausfahrt	-	-	1.0
Einfahrt	0 $\times l_{req}$	-	2.80
	0.5 $\times l_{req}$		2.36
	1.0 $\times l_{req}$		1.91
	2.0 $\times l_{req}$		1.03
Ausfahrt	-	0 $\times l_{req}$	1.86
		0.5 $\times l_{req}$	1.64
		1.0 $\times l_{req}$	1.42
		2.0 $\times l_{req}$	0.98
Kombination I	0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	4.68
	0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	4.29
	0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	3.90
	0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	3.11
	0.5 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	4.06
	0.5 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	3.71
	0.5 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	3.35
	0.5 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	2.64
	1.0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	3.44
	1.0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	3.13
	1.0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	2.81
	1.0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	2.18
	2.0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	2.21
	2.0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	1.97
	2.0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	1.72
	2.0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	1.24
Kombination II	0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	4.07
	0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	3.70
	0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	3.33
	0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	2.58
	0.5 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	3.36
	0.5 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	3.07
	0.5 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	2.78
	0.5 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	2.21
	1.0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	2.65
	1.0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	2.45
	1.0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	2.24
	1.0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	1.84
	2.0 $\times l_{req}$	0 $\times l_{req}$	1.23
	2.0 $\times l_{req}$	0.5 $\times l_{req}$	1.19
	2.0 $\times l_{req}$	1.0 $\times l_{req}$	1.16
	2.0 $\times l_{req}$	2.0 $\times l_{req}$	1.09

Kurvenradius im Tunnel

Der Kurvenradius hat einen Einfluss auf die Unfallhäufigkeit. Auf einer grösseren Skala haben längere Streckenabschnitte, die eine grössere Kurvigkeit aufweisen, in Summe eine geringere Unfallrate als ganz gerade Streckenabschnitte. Daher werden in der Planung häufig lange gerade Strassenabschnitte durch Strecken mit einem grossen Kurvenradius ersetzt. Damit verringert sich die Monotonie einer Strecke und dies erhöht die Aufmerksamkeit.

Die Unfallrate nimmt jedoch wieder zu, wenn die Kurvenradien kleiner werden. Es wird daher angestrebt, eine Linienführung zu erhalten, die nicht zu monoton ist, aber kleine Radien vermeidet. Dies ist in der Praxis nicht immer möglich und bei bestehenden Tunneln nicht immer erfüllt.

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

Das folgende Modell zur Berücksichtigung des Kurvenradius $z[m]$ und des Unfallmodifikationsfaktors unter Berücksichtigung der signalisierten Geschwindigkeit $v[km/h]$ wurde auf Basis von Expertenschätzungen erstellt [33]:

$$UMF = \max ((-\ln(z) \cdot 1.508 \cdot 10^{-4} + 1.119 \cdot 10^{-3})v^2 - (\ln(z) \cdot 1.217 \cdot 10^{-4} + 1.237 \cdot 10^{-2})v + 1; 0.95) \quad (10)$$

Der graue Bereich in Abb. 4.23 kennzeichnet den Bereich der zulässigen Projektierungsgeschwindigkeit nach [19]. Mit diesem Bereich wurde das Modell plausibilisiert.

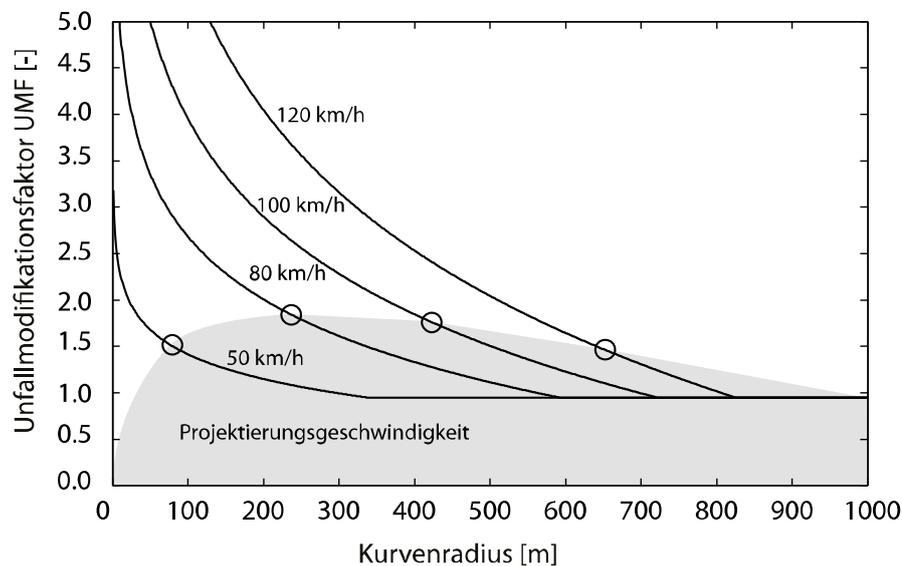


Abb. 4.23 Unfallmodifikationsfaktor in Abhängigkeit des Kurvenradius und der signalisierten Geschwindigkeit.

Der gemeinsame Einfluss der beiden Indikatoren wird über die Kanten im Bayes'schen Netz auf den Knoten UMF berücksichtigt. Der Zusammenhang ist in Abb. 4.23 gegeben.

Längsneigung

Die Längsneigung der Fahrbahn im Tunnel beeinflusst das Risiko für die Verkehrsteilnehmer auf verschiedene Arten. Steigungsstrecken und Gefällestrrecken führen zu einer erhöhten Unfallrate. Die Häufigkeit für Pannen nimmt auf Steigungsstrecken zu und damit auch die Gefahr für Auffahrunfälle mit Personenschäden. Auf Steigungsstrecken steigt die Brandwahrscheinlichkeit durch Überhitzen von Motoren. Auch die Funktionalität von Lüftungssystemen wird von Steigungen und Gefälle beeinflusst.

Der Indikator Längsneigung beeinflusst daher die Unfallwahrscheinlichkeit und die Brandwahrscheinlichkeit im Tunnel, sowie die Konsequenzen im Falle von Ereignissen.

In [62] werden mehrere Gründe für die Zunahme der Unfallraten bei Gefällestrrecken erwähnt.

Auf Gefällestrrecken könnte die erhöhte Fahrgeschwindigkeit und die längeren Bremswege eine Rolle spielen. Auf Steigungsstrecken könnte der Unterschied zwischen langsameren und schnelleren Fahrzeugen eine Rolle spielen.

Ein Model, welches von [63] entwickelt wurde und von [49] an Daten aus Österreich bestätigt werden konnte, hat die folgende Form:

$$UMF = e^{0,081 \cdot (|G|-2)} \tag{11}$$

Hierin bezeichnet G die Längsneigung und wird in % eingesetzt. Um das Model von [63] auf die Basisrate von Tunneln anwenden zu können, wurde es um 2 % verschoben. Damit wurde berücksichtigt, dass im Mittel die Tunnelsegmente eine Steigung von 2 % haben (siehe Daten aus [50]).

Unter Verwendung von Gleichung (11) ergibt sich das in Abb. 4.24 dargestellte Verhältnis von UMF und Längsneigung.

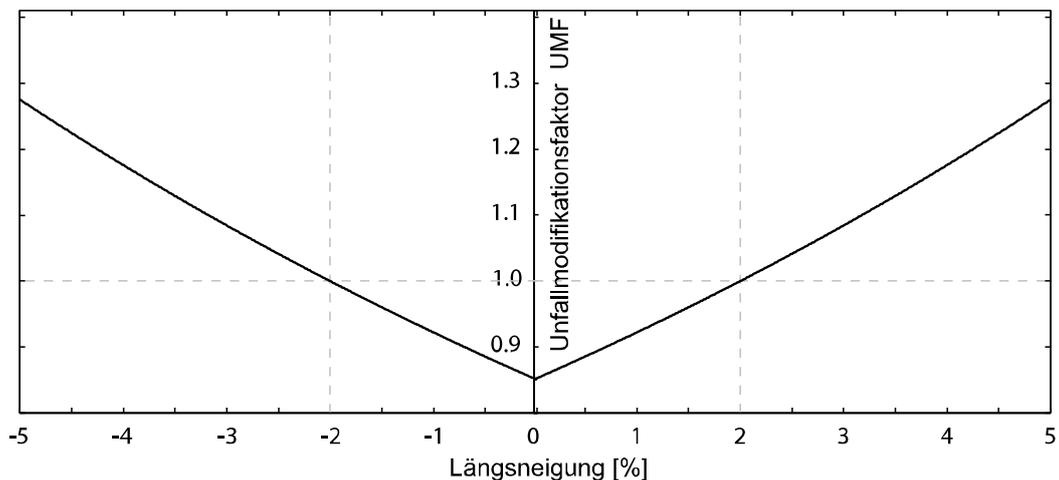


Abb. 4.24 Unfallmodifikationsfaktor in Abhängigkeit der Längsneigung.

Generell kann angenommen werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Längsneigung und dem horizontalen Kurvenradius besteht. Bisher gibt es diesbezüglich keine Untersuchungen, so dass zurzeit noch eine Unabhängigkeit dieser beiden Faktoren angenommen wird.

Es wird beobachtet, dass die Längsneigung im Tunnel einen Einfluss auf die Häufigkeit

von Brandereignissen in Tunneln hat. Auch Gefällestrrecken vor dem Tunnel (in Fahrtrichtung) wirken sich auf die Brandwahrscheinlichkeit aus.

Da bisher kein Modell in der Literatur vorhanden ist, wird als Indikator für die Brandhäufigkeit das Model von Pannenfahrzeugen verwendet. Dieses Model wurde von [64] entwickelt und ist auch in [30] verwendet worden. Dort wurde beobachtet, dass nur eine Steigung ab 2 % einen negativen Effekt auf die Brandereignisrate hat. Steigungen von weniger als 2 % und Gefällestrrecken haben eine reduzierte Brandereignisrate. Analog zum Unfallmodifikationsfaktor, der in 4.2.2 beschrieben ist, wird auch ein Modifikationsfaktor für die Brandereignisrate verwendet, der dieselben Eigenschaften hat wie der UMF. Der Brandmodifikationsfaktor BMF ist wie folgt definiert:

$$BMF = \begin{cases} 0.773 + 6.27 \cdot 10^{-2} \cdot G^2 & G > 0\% \\ 0.773 & G \leq 0\% \end{cases} \quad (12)$$

Hierin ist G die Längsneigung und wird in % eingesetzt. Der BMF in Abhängigkeit der Längsneigung ist in Abb. 5.49 dargestellt.

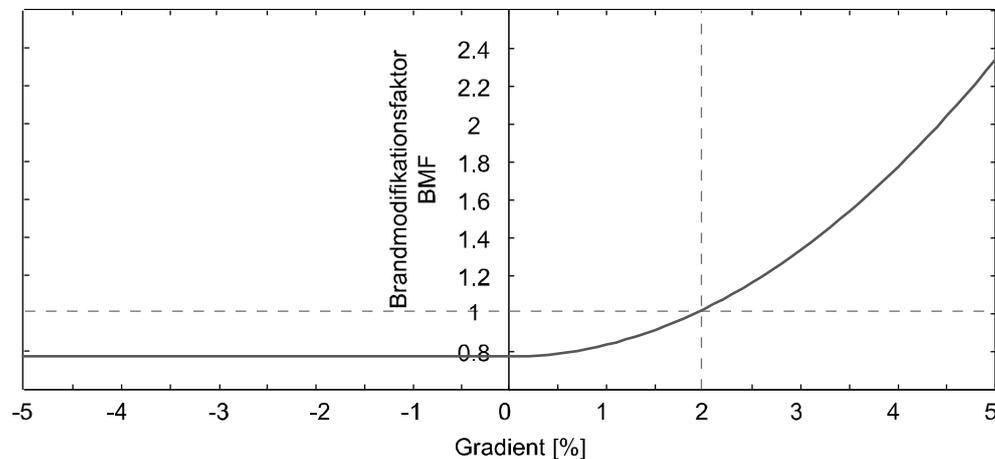


Abb. 4.25 Brandmodifikationsfaktor in Abhängigkeit der Längsneigung.

Fahrspurbreite

Die Breite des Tunnelquerschnitts und die Fahrspurbreite haben einen Einfluss auf die Unfallrate im Tunnel [50]. Der Einfluss ist generell eher gering, wenn die Normen und Richtlinien eingehalten werden. In Fällen, in denen die normativen Anforderungen nicht eingehalten werden können, sollte der Einfluss auf die Unfallrate berücksichtigt werden.

Dabei ist die Unfallrate abhängig von der Fahrspurbreite und der signalisierten Geschwindigkeit. Je geringer die Fahrspurbreite und je höher die signalisierte Geschwindigkeit, desto höher die Unfallrate. Dies kann durch das folgende Modell, welches auf Expertenschätzungen zurückgeht [33], berücksichtigt werden:

$$AMF = (67.78 \ln(v)^{0.091} - 242 \ln(v)^{-1}) w^{-3.095} + (-0.102 \ln(v)^{0.091} + 1.15 \ln(v)^{-1}) w \quad (13)$$

Hierin bezeichnet $v[km/h]$ die signalisierte Geschwindigkeit und $w[m]$ die Fahrspurbreite.

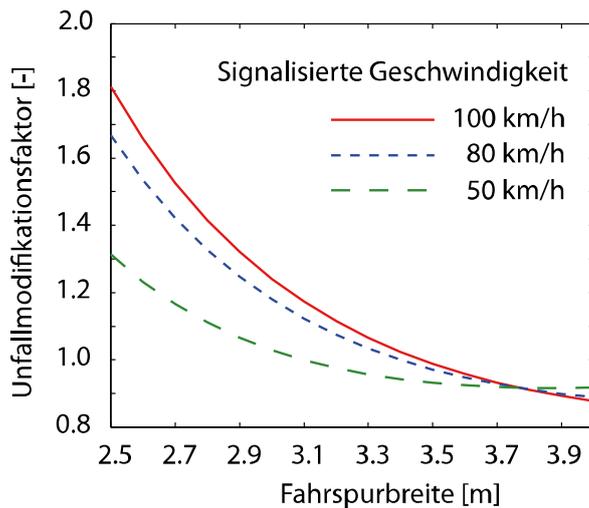


Abb. 4.26 Unfallmodifikationsfaktor in Abhängigkeit der signalisierten Geschwindigkeit und der Fahrspurbreite.

In Abb. 4.26 ist der Zusammenhang zwischen signalisierter Geschwindigkeit, Fahrspurbreite und dem Unfallmodifikationsfaktor dargestellt.

Abb. 4.26 zeigt, dass eine steigende Anzahl Fahrspuren generell einen positiven Effekt auf die Unfallrate hat. Bei geringer signalisierter Geschwindigkeit und sehr grosser Fahrspurbreite steigt die Unfallrate wieder leicht an. Dies kann zum einen dadurch erklärt werden, dass gefährliche Überholmanöver zunehmen, zum anderen dadurch, dass dem Fahrer die Leiteinrichtung fehlt.

Anzahl Fahrspuren

In Abb. 4.1 nimmt der Knoten *Anzahl Fahrspuren* eine zentrale Rolle ein. Die Anzahl Fahrspuren beeinflussen die Kapazität und die Verkehrsgüte des Tunnels. Die Anzahl Fahrspuren und die Verkehrsmenge haben einen nicht linearen Einfluss auf die Unfallrate. Die Anzahl Fahrspuren beeinflussen auch die Häufigkeit von Fahrspurwechseln.

Verkehrsführung

Wird der Verkehr als Richtungsverkehr in Tunneln geführt, so werden Frontalkollisionen und Begegnungsunfälle vermieden. Hiervon ausgenommen sind Falschfahrer. Als Falschfahrer werden Benutzer einer Strasse mit geteilten Richtungsfahrbahnen bezeichnet, die entgegen der vorgeschriebenen Fahrtrichtung fahren.

Zudem können Blendeffekte durch Abblendlicht und Unsicherheiten des Fahrers durch geringen Abstand zum entgegenkommenden Verkehr im Richtungsverkehr vermieden werden. In Richtungsverkehrstunneln sind daher die Unfallrate und die Todesfallrate geringer als in Gegenverkehrstunneln.

Die Daten aus Österreich suggerieren, dass die Unfallrate in Richtungsverkehrstunneln deutlich höher ist als in Gegenverkehrstunneln [47], wie auch Abb. 4.27 zeigt. Diese Beobachtung ist zunächst kontraintuitiv. Frühere Studien des Kuratoriums für Verkehrssicherheit in Österreich kommen zu einem ähnlichen Schluss.

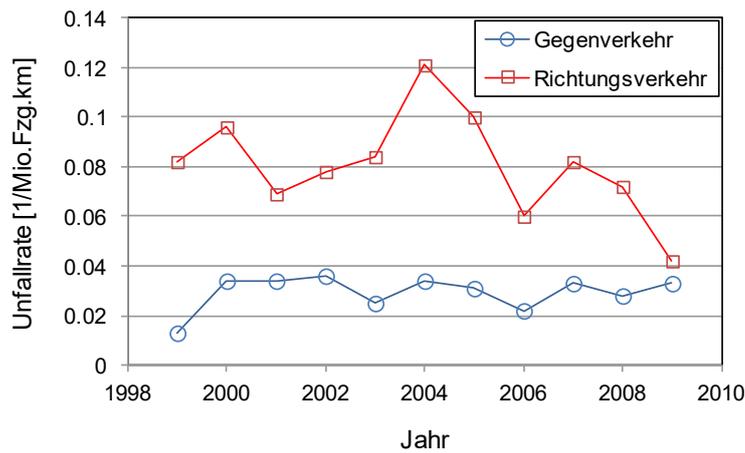


Abb. 4.27 Entwicklung der Unfallraten in Richtungsverkehrs- und Gegenverkehrstunneln in Österreich von 1999-2009 aus [47].

Die Schlussfolgerung, dass die Unfallraten im Richtungsverkehrstunnel geringer sind als in Gegenverkehrstunneln ist gemäss Abb. 4.27 richtig, jedoch ist dieser einfache Vergleich nicht sinnvoll.

In Gegenverkehrstunneln herrschen andere Bedingungen, die den unbereinigten Vergleich zwischen den Unfallraten nicht direkt zulassen. So sind beispielsweise generell die Verkehrsmengen in Gegenverkehrstunneln geringer und in der Regel sind auch die signalisierten Geschwindigkeiten geringer.

Beides sind Faktoren, die die Unfallrate signifikant beeinflussen.

Ein Vergleich an zwei Tunneln aus dem Zeitraum von 1995-1999 soll dies illustrieren. Beide Tunnel sind in etwa gleich lang, damit der Einfluss der Portalbereiche in etwa gleich ist. Die Charakteristiken sind in Abb. 4.28 gegeben. Die Daten stammen aus [50] und berücksichtigen alle Unfälle.

Die Verkehrsmenge und die signalisierte Geschwindigkeit sind in beiden Tunneln sehr unterschiedlich. Betrachtet man die Unfallraten, so zeigt sich, dass die Unfallrate im Richtungsverkehrstunnel höher ist als im Gegenverkehrstunnel. Bereinigt man die Daten, d.h. sie werden unter Verwendung der Unfallmodifikationsfaktoren für die Verkehrsmenge und für die Geschwindigkeit auf das gleiche Niveau normalisiert, so ist die Unfallrate im Richtungsverkehrstunnel im Mittel 1.7 mal geringer als im Gegenverkehrstunnel (siehe rechte Spalte in Abb. 4.28).

Abb. 4.28 Vergleich der Unfallraten in RV- und GV-Tunneln an einem Beispiel.

	Tunnel 1					
Jahr	1995	1996	1997	1998	1999	Ø
Anzahl Röhren	2	2	2	2	2	2
Sig. Geschwindigkeit	100	100	100	100	100	100
Länge	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
DTV	48460	49470	51720	53420	54400	51494
Anzahl Unfälle	15	20	15	14	20	16.8
Unfallrate [Mio. Fzg. Km]	0.4988	0.6515	0.4674	0.5224	0.5325	0.5258
UMF Verkehrsmenge	2.364	2.431	2.521	2.553	2.531	2.566
UMF Geschwindigkeit	1.563	1.563	1.563	1.563	1.563	1.563
Unfallrate normalisiert	0.1351	0.1715	0.1153	0.1056	0.1498	0.1311
	Tunnel 2					
Jahr	1995	1996	1997	1998	1999	Ø
Anzahl Röhren	1	1	1	1	1	1
Sig. Geschwindigkeit	80	80	80	80	80	80
Länge	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
DTV	12624	12639	12984	13164	13015	12896
Anzahl Unfälle	2	4	6	2	3	3.4
Unfallrate [Mio. Fzg. Km]	0.1973	0.3925	0.5755	0.1892	0.2871	0.3283
UMF Verkehrsmenge	1.420	1.431	1.477	1.506	1.482	1.463
UMF Geschwindigkeit	1	1	1	1	1	1
Unfallrate normalisiert	0.139	0.274	0.390	0.1256	0.1903	0.244

Dies deckt sich auch mit Studien in [65]. Dort werden die Unfallraten des Seelisbergtunnels mit den Unfallraten des Gotthardtunnels zwischen 1989-1996 verglichen. Die Verkehrsmenge in beiden Tunneln ist nahezu gleich. Es wurde beobachtet, dass die Unfallrate im Gotthardtunnel um den Faktor 2 höher ist als im Seelisbergtunnel (alle Unfälle). Dies deckt sich auch mit Studien aus Norwegen [43].

Der positive Effekt einer Richtungstrennung des Verkehrs unter Berücksichtigung der Datengrundlage und Bereinigung der anderen Einflüsse wird mit den folgenden Unfallmodifikationsfaktoren berücksichtigt:

$$\begin{aligned}
 UMF_{RV} &= 0.6 \\
 UMF_{GV} &= 1.3
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Die Verkehrsführung beeinflusst auch die Fluchtwahrscheinlichkeit für eine Person im Brandfall, die sich im Tunnel befindet, insbesondere bei einem Brand, dessen Rauchausbreitung durch die Lüftung gesteuert wird. Der Einfluss kann unter Verwendung von komplexen numerischen Analysen berechnet werden, wobei die Ergebnisse sehr sensitiv in Bezug auf die Eingabe der benötigten Parameter sind. Hier wird derzeit ein heuristischer Ansatz gewählt.

Das erhöhte Risiko durch Überholvorgänge in Tunneln ist nicht explizit berücksichtigt. Implizit enthalten die verwendeten Basisraten auch Unfälle infolge von Überholvorgängen. Daher sind diese Unfälle implizit berücksichtigt.

Abstand Notausgänge

Je weiter sich eine Person vom Notausgang entfernt befindet, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit verletzt zu werden oder zu Tode zu kommen. Um den Effekt des Abstands der Notausgänge zu berücksichtigen wurden Simulationen mit der Software ODEM durchgeführt. Detailliertere Beschreibungen finden sich im Abschnitt für den Indikator „Personenschaden durch Brand“ und in [52].

Tunnelbeleuchtung

Die Tunnelbeleuchtung kann die Unfallraten in Tunneln positiv beeinflussen. Die Beleuchtung kann zum einen die Übersichtlichkeit im ganzen Tunnel verbessern, zum anderen kann sie Helligkeitsunterschiede zwischen Fahrzeugen verringern, Blendeffekte von Fahrzeugen reduzieren und den Kontrast zwischen Objekten erhöhen. Anpassungen des Auges an die Verhältnisse werden erleichtert und eine Entspannung des Auges wird erreicht. Dies erhöht die Konzentrationsfähigkeit der Fahrer.

Die Beleuchtung des Tunnels wird durch die Leuchtdichte auf der Fahrbahn in Candela pro Quadratmeter beschrieben.

Die Leuchtdichte kann abhängig von der Fahrtrichtung sein. In den Ein- und Ausfahrtportalen werden häufig andere Beleuchtungssysteme verwendet als für die Durchfahrtsbeleuchtung im Tunnelinneren (z.B. Adaptionssysteme).

Die Beleuchtung in Tunneln ist in SN 640551-1 [20] geregelt. Hierin finden sich Bemessungsregeln für die Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Portal.

Die Grösse des Einflusses der Tunnelbeleuchtung auf die Unfallrate ist durch Studien noch nicht vollständig belegt. Ein positiver Effekt der Tunnelbeleuchtung ist jedoch unumstritten, so dass eine vereinfachte Formel für den Einfluss der Tunnelbeleuchtung wie folgt gemäss [33] formuliert werden kann:

$$UMF = 1.05 \cdot e^{(-0.4 \cdot L)} + 0.55 \tag{15}$$

Hierin bezeichnet L die Leuchtdichte in $[cd/m^2]$. Diese Formel ist in Abb. 4.29 dargestellt.

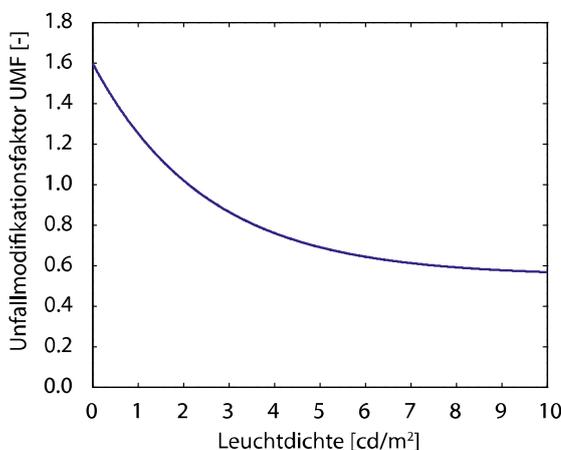


Abb. 4.29 Beziehung zwischen dem UMF und der Leuchtdichte im Inneren des Tunnels.

Im Bayes'schen Netz werden die UMF berücksichtigt, die in Abb. 4.30 gegeben sind.

Abb. 4.30 UMF für die Tunnelbeleuchtung.

Tunnel Beleuchtung [cd/m ²]	UMF
< 0.5	1.60
0.5 - 1	1.41
1-2	1.25
2-3	1
3-4	0.87
4-5	0.76
6-8	0.69
> 8	0.59

Die Leuchtdichte, die im Modell berücksichtigt wird, ist die Leuchtdichte am Tag. Das Modell berücksichtigt die Variation der Lichtverhältnisse ausserhalb des Tunnels und der geringeren Beleuchtung im Tunnel.

Die Werte berücksichtigen lediglich die direkten Effekte der Beleuchtung. Geschwindigkeitseffekte durch bessere Sicht werden hier nicht berücksichtigt.

Für die Einfahrtszonen, d.h. die Zone 2 und die Zone 3 kann das Leuchtdichtemodell aus Abb. 4.29 nicht direkt verwendet werden. Um die spezifischen Bedingungen in den Einfahrtszonen zu berücksichtigen, ist eine äquivalente Leuchtdichte zu bestimmen. Diese äquivalente Leuchtdichte berücksichtigt die Normenkonformität der Beleuchtung der Einfahrtzone. Die äquivalente Leuchtdichte wird mittels Abb. 4.31 bestimmt. Ist die Norm genau erfüllt, so ist eine äquivalente Leuchtdichte von 2.1 anzunehmen. Der Verhältniswert kann als Erfüllungsfaktor interpretiert werden.

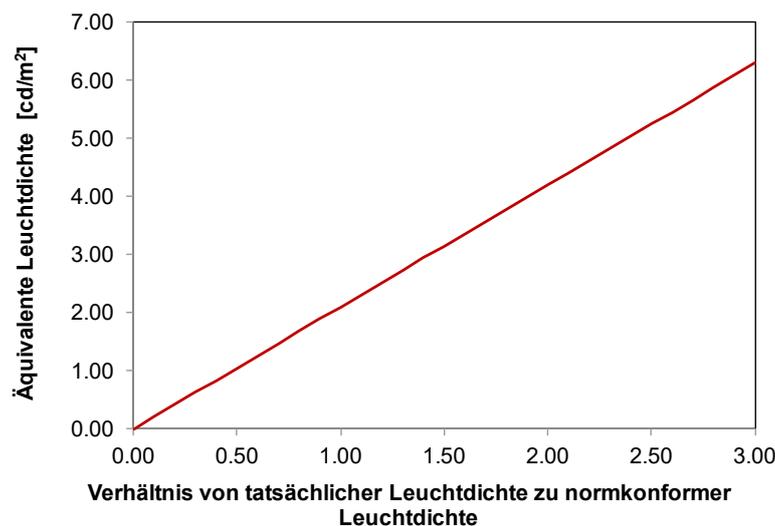


Abb. 4.31 Äquivalente Leuchtdichte in Zone 2 und 3 im Verhältnis zum Erfüllungsgrad der Norm.

$$\text{Äquivalente Leuchtdichte} = 2.1 \cdot \text{Verhältniswert} \tag{16}$$

In der Regel liegen keine Messungen der Leuchtdichte im Tunnel vor. Bei Ausführungsprojekten können, wenn vorhanden, die Projektgrundlagen verwendet werden.

Im Massnahmenkonzept und im Ausführungskonzept kann mit den *a-priori* Verteilungen gerechnet werden, wenn keine Informationen über die Beleuchtung vorliegen (siehe Anhang I.1.15).

Informationen zur Beleuchtung in Tunneln sind nicht immer verfügbar. Für den Umgang mit den verschiedenen Informationsgraden in der Risikoanalyse, kann der Ablaufplan nach Abb. 4.32 verwendet werden, um die zu verwendenden Leuchtdichten für die Risikoanalyse zu ermitteln.

Der erste Schritt ist die Prüfung, ob Messungen zur Leuchtdichte vorhanden sind.

Sind Messungen vorhanden, so ist in einem zweiten Schritt die Leuchtdichte gemäss SN 640551-1 [20] für die Zonen 2 und 3 im Tunnel zu ermitteln. Für diese Zonen wird das Verhältnis von Bemessungsleuchtdichte zu gemessener Leuchtdichte für die homogenen Segmente in Zone 2 und 3 gebildet. Die Verhältnswerte sind für die definierten homogenen Segmente dabei in geeigneter Weise zu mitteln. Für die Verhältnswerte sind die äquivalenten Leuchtdichten der Einfahrtszonen zu ermitteln (nach Abb. 4.31 bzw. Gleichung (16)). Diese äquivalente Leuchtdichte für die Zonen 2 und 3 sind die Eingangswerte für die Risikoanalyse.

Sind keine Messungen vorhanden, so ist zu prüfen, ob Unterlagen zur ursprünglichen Bemessung zur Leuchtdichte vorhanden sind.

Sind Bemessungsgrundlagen vorhanden und entsprechen diese der SN 640551-1 [20], so können die Verhältnswerte zu 1 gesetzt werden und die äquivalenten Leuchtdichten direkt unter Verwendung von Gleichung (16) bestimmt werden. Entspricht die Bemessung nicht den Anforderungen der SN 640551-1 [20], so ist die Bemessungsleuchtdichte nach SN 640551-1 [20] zu bestimmen und der Verhältnswert zu bilden. Unter Verwendung des Verhältnswertes ist die äquivalente Leuchtdichte für die Zonen 2 und 3 zu ermitteln.

Sind keine Messungen und keine Informationen zur ursprünglichen Bemessung vorhanden, so ist mit den *a-priori* Verteilungen nach Anhang I.1.15 zu rechnen.

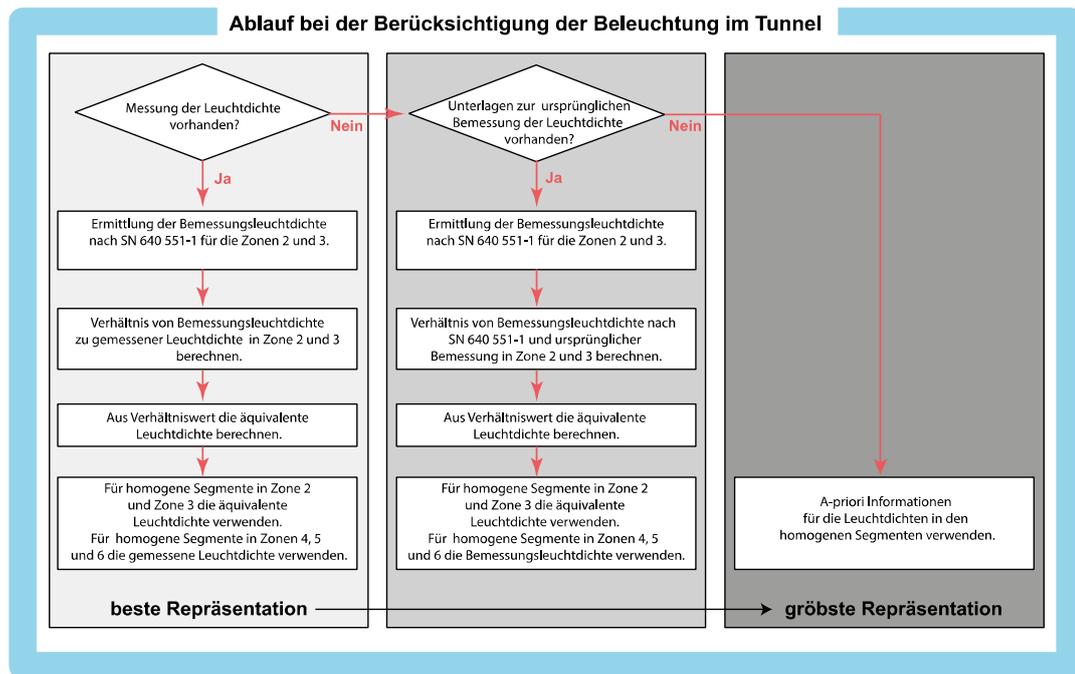


Abb. 4.32 Ablaufplan zur Ermittlung der Leuchtdichten und äquivalenten Leuchtdichten, die in der Risikoanalyse berücksichtigt werden.

Die konkreten Arbeitsschritte sind in Abb. 4.33 illustriert. Liegen Informationen zur Leuchtdichte entweder in Form von Messungen oder in Form der ursprünglichen Auslegung der beleuchtung vor, so ist in einem ersten Schritt die Normanforderung gemäss [20] zu bestimmen (Abb. 4.33 - Ausgangslage). Im zweiten Schritt wird das Verhältnis der Normanforderung gemäss [20] mit den gemessenen Werten gebildet und über die Länge der Zone gemittelt (Abb. 4.33 – Berechnung der Verhältniswerte). Für die Zone 2 ergibt sich in Abb. 4.33 ein mittlerer Verhältniswert von 0.78. Dies bedeutet, dass die Normanforderung zu 78% erfüllt ist. Mit diesen Mittelwerten wird dann über die Gleichung (16) die äquivalente Leuchtdichte für diese Zonen bestimmt. Die äquivalente Leuchtdichte wird anschliessend verwendet, um den Unfallmodifikationsfaktor UMF nach Gleichung (15) zu berechnen. Für die Zone 2 ergibt sich in Abb. 4.33 ein UMF von 1.09 [-].

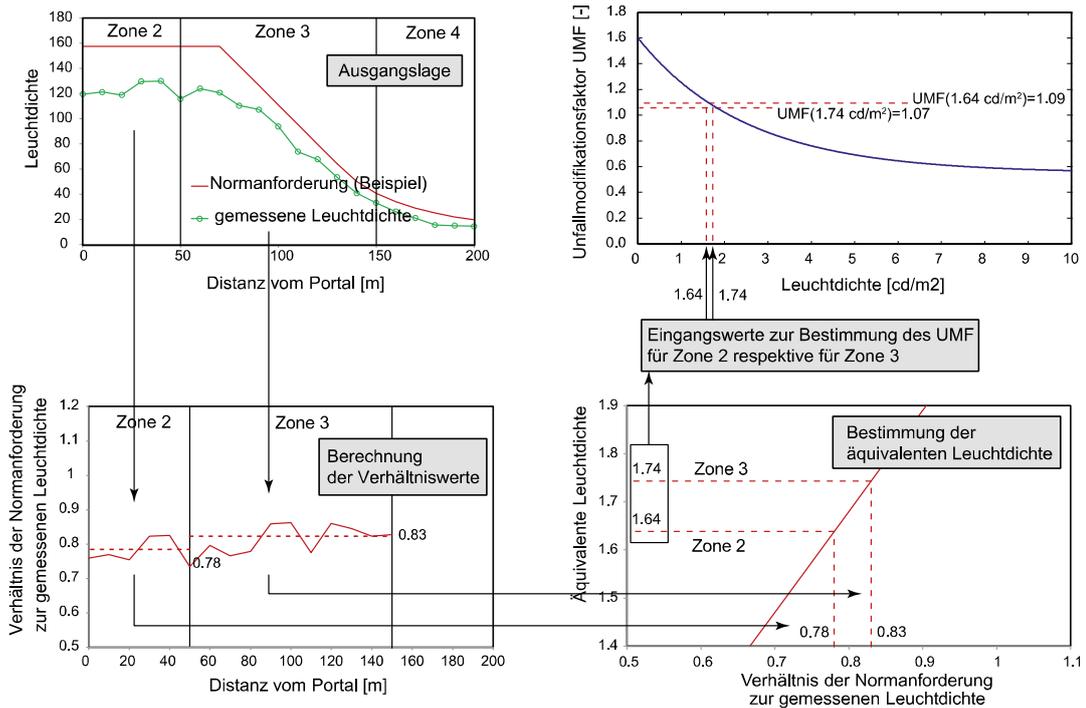


Abb. 4.33 Darstellung der Ermittlung der äquivalenten Leuchtdichte für die Zonen 2 und 3 im Tunnel für den Fall, dass Messungen der Leuchtdichte vorliegen.

Lüftungssystem

Die Risikoanalyse berücksichtigt fünf prinzipielle verschiedene Referenzlüftungssysteme, welche die Ausgangslage bilden, um alle vorhandenen Lüftungssysteme abzubilden:

1. Natürliche Lüftung;
2. Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
3. Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
4. Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
5. Rauchabsaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit.

Die möglichen weiteren Lüftungssysteme, die in der Praxis vorhanden sind, sind:

6. Halbquerlüftung Zuluft;
7. Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
8. Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
9. Querlüftung (Zu- und Abluft) ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
10. Querlüftung (Zu- und Abluft) mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
11. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal >200 m (typisch Mittenabsaugung) ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
12. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal >200 m (typisch Mittenabsaugung) mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
13. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal <200 m ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit;
14. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal <200 m mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit.

Im Folgenden werden die Lüftungssysteme beschrieben.

1. Natürliche Lüftung

Liegt kein mechanisches Lüftungssystem vor, stellt sich im Ereignisfall eine Natürliche Lüftung ein.

2. Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

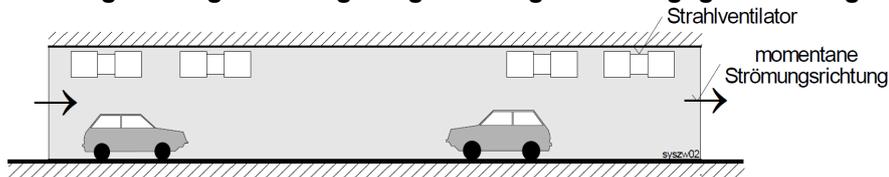


Abb. 4.34 Längslüftung mit Strahlventilatoren [10].

Bei der Längslüftung wird typischerweise mit Hilfe von Strahlventilatoren eine Längsströmung erzeugt, die im Ereignisfall den Rauch über die Portale ausbläst (siehe Abb. 4.34). Die Ausblasrichtung ist entweder durch die Fahrtrichtung oder durch die vorherrschende Strömungsrichtung vorgegeben, welche von der Druckwirkung des Verkehrs, der Temperatur und der meteorologischen Druckdifferenz an den Portalen bestimmt wird. Ist keine Regelung vorhanden, kann die Geschwindigkeit der Längsströmung nicht beeinflusst werden und die Lüftungsanlage wird mit festen Einstellungen betrieben.

3. Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Die Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit bläst im Ereignisfall den Rauch über die Portale aus. Ein aktives Regelungssystem stellt durch Messungen im Fahrraum die geforderte Längsströmungsgeschwindigkeit ein.

4. Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

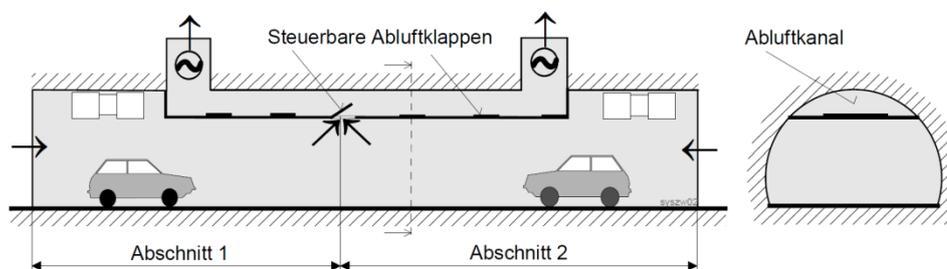


Abb. 4.35 Absaugung ohne Zuluft [10].

Die Rauchabsaugung ohne Zuluft ist in Abb. 4.35 dargestellt. Im Ereignisfall werden nur die Abluftklappen im Bereich um den Brandort geöffnet und der Rauch über den Abluftkanal abgesaugt. Besteht keine Regelung, ist die Kontrolle der Längsströmungsgeschwindigkeit nicht möglich und unter gewissen Druckverhältnissen wird ein Teil der Rauchgase an der Absaugstelle vorbeiströmen.

5. Rauchabsaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Die Rauchabsaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit enthält zusätzlich zu den regelbaren Abluftklappen typischerweise Strahlventilatoren, mit deren Hilfe die Regelung der Strömungsgeschwindigkeit möglich ist (siehe auch Abb. 4.35). Es ist somit möglich, ungünstigen Druckverhältnissen entgegenzuwirken, um sicherzustellen, dass die Rauchgase nicht an der Absaugstelle vorbeiströmen.

6. Halbquerlüftung Zuluft

Bei der Halbquerlüftung Zuluft wird im Normalbetrieb über die gesamte Länge eines Lüftungsabschnittes Zuluft eingeblasen. Im Brandfall kann diese Zuluft einblasung abgestellt werden und der Tunnel wird ohne Nutzung eines mechanischen Lüftungssystems entraucht.

7. Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Bei der Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung wird während des Normalbetriebs über die gesamte Länge eines Lüftungsabschnittes abgesaugt, so dass Frischluft über die Portale nachströmt. Gewisse reversierbare Lüftungssysteme bringen während des Normalbetriebs Zuluft über den Kanal und reversieren die Strömungsrichtung, so dass sie im Brandfall über denselben Kanal Rauch absaugen können. Normalerweise wird der Bereich der Absaugung auf grössere Länge ausgedehnt, verteilt um den Brandort.

8. Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Ist bei der Halbquerlüftung eine Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit vorhanden, kann zusätzlich z.B. mit Hilfe von Strahlventilatoren die Längsströmungsgeschwindigkeit beeinflusst werden.

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

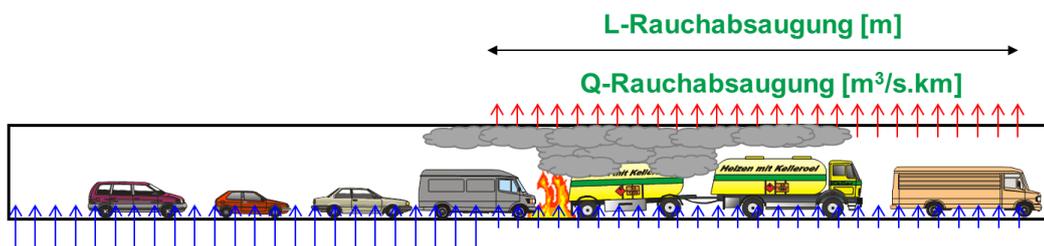


Abb. 4.36 Querlüftung (Zu- und Abluft) im Brandfall.

Bei der Querlüftung wird während des Normalbetriebs - zusätzlich zum Einblasen von Zuluft - Abluft über eine grösserer Länge verteilt abgesaugt. Im Ereignisfall kann die Zuluft je nach Lüftungsabschnitt angehalten werden, sodass nur Rauch abgesaugt wird. Gewisse Querlüftungssysteme sehen jedoch vor, eine reduzierte Zuluftmenge im Entrauchungsabschnitt einzublase.

10. Querlüftung (Zu- und Abluft) mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Enthält die Querlüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit zusätzlich zu den Zu- und Abluft z.B. Strahlventilatoren, so kann die Längsströmungsgeschwindigkeit während der Rauchabsaugung geregelt werden.

11. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal >200 m (typisch Mittenabsaugung) ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

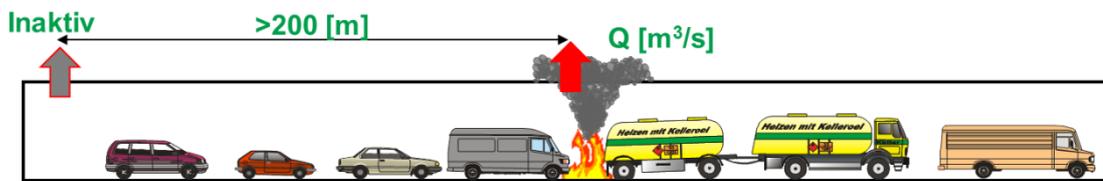


Abb. 4.37 Feste Punktabsaugung mit Abständen >200 m im Brandfall.

Punktabsaugungen werden z.B. als Mittenabsaugung in Gegenverkehrstunnel eingesetzt. An der Absaugstelle werden grosse Mengen Luft abgesaugt, die über die Portale nachströmt. Ein solches Lüftungssystem kann als Längslüftung betrachtet werden. Ein Sonderfall stellt die Portalluftabsaugung dar, welche gezielt die Tunnelluft vor dem Portal absaugt, um die Umgebung vor der mit Schadstoffen belasteten Tunnelluft zu schützen.

12. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal >200 m (typisch Mittenabsaugung) mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Enthält die Punktabsaugung zudem z.B. Strahlventilatoren, kann die Längsströmungsgeschwindigkeit während der Rauchabsaugung geregelt werden.

13. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal <200 m ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Bei einem Lüftungssystem mit Punktabsaugungen, die weniger als 200 m voneinander oder den Portalen entfernt sind, wird im Ereignisfall über eine oder mehrere Punktabsaugungen abgesaugt. Dies ähnelt einer Rauchabsaugung (4/5), wenn lediglich über einen Bereich von 200 m um den Brandort abgesaugt wird.

14. Feste Punktabsaugung in Abständen zueinander bzw. zum Portal <200 m mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

Sind bei einem Lüftungssystem mit Punktabsaugungen, die weniger als 200 m voneinander oder den Portalen entfernt sind, zudem z.B. Strahlventilatoren vorhanden, kann die Längsströmungsgeschwindigkeit während der Rauchabsaugung geregelt werden.

Die Referenzlüftungssysteme (1.- 5.) stellen die Ausgangslage zur Berechnung von weiteren Lüftungssystemen dar. Durch geeignete Kombination von verschiedenen Referenzsystemen und dem dazugehörigen Referenzgrad können die nicht berechneten Lüftungssysteme abgebildet werden.

Der Referenzgrad ist ein Mass, um die Abweichung zu dem Referenzlüftungssystem zu bestimmen. Er nimmt den maximalen Wert von 1.0 an, falls das zu untersuchende Lüftungssystem einem nach der derzeit gültigen ASTRA Richtlinie [10] ausgelegtem Referenzsystem entspricht. Wird ein unterdimensioniertes oder ein nicht den Referenzlüftungssystemen entsprechendes Lüftungssystem betrachtet, nimmt der Referenzgrad einen Wert zwischen Null und Eins an.

Die Lüftungssysteme 6 bis 14 werden je nach Eigenschaften mit Hilfe des Referenzgrades und entsprechendem Referenzlüftungssystem abgebildet. In der Abb. 4.38 kann für jedes dieser Lüftungssysteme das entsprechende Referenzlüftungssystem ausgelesen werden. Es ist zu beachten, dass je nach Auslegung des Lüftungssystems ein anderes Referenzlüftungssystem angewendet werden muss.

Damit sind die massgebenden vorhandenen Lüftungssysteme beschrieben und können auf die fünf prinzipiellen Systeme zurückgeführt werden.

Für die Umsetzung eines beliebigen Lüftungssystems ist es notwendig, die Abweichung zu den Referenzlüftungssystemen zu kennen. Dazu wird der Referenzgrad mit Hilfe der in Abb. 4.39 angegebenen Verhältnissen für das entsprechende Lüftungssystem ermittelt. Mit dem Referenzgrad wird linear zwischen den Ergebnissen der Natürlichen Lüftung und denjenigen des Referenzlüftungssystems interpoliert. Eine Extrapolation der Simulationsergebnisse ist nicht möglich, darum ist der Referenzgrad auf den Maximalwert von 1.0 beschränkt.

Abb. 4.38 Auswahl der Referenzsysteme.

System	Regelung	Nr.	Bedingung	Umsetzung	System
Halbquerlüftung Zuluft	ohne	6a	Zuluft < 6[m/s]*Tunnelquerschnitt[m ²]	Natürliche Lüftung	1.
		6b	Zuluft > 6[m/s]*Tunnelquerschnitt[m ²]	Längslüftung ohne Regelung	2.
Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung	ohne	7		Rauchabsaugung ohne Regelung(4)	4.
	mit	8a	Dimensionierung Längslüftung ≠ Referenzsystem	Rauchabsaugung ohne Regelung (4)	4.
		8b	Dimensionierung Längslüftung = Referenzsystem	Rauchabsaugung mit Regelung (5)	5.
Querlüftung (Zu- und Abluft)	ohne	9a	Zuluft > Abluft	Natürliche Lüftung (1)	1.
		9b	Zuluft < Abluft	Rauchabsaugung ohne Regelung (4)	4.
		9c	Zuluft > 6[m/s]*Tunnelquerschnitt[m ²]	Längslüftung ohne Regelung (2)	2.
	mit	10a	Zuluft > Abluft	Natürliche Lüftung (1)	1.
		10b	Dimensionierung Längslüftung ≠ Referenzsystem	Rauchabsaugung ohne Regelung (4)	4.
		10c	Dimensionierung Längslüftung = Referenzsystem	Rauchabsaugung mit Regelung (5)	5.
Feste Punktabsaugung in Abständen zu einander bzw. zum Portal >200 m	ohne	11a	200 m um die aktive Punktabsaugung	Rauchabsaugung ohne Regelung (4)	4.
		11b	Ausserhalb des Bereiches 200 m um die Punktabsaugung	Natürliche Lüftung (1)	1.
		11c	Betrachtung des gesamten Tunnels	Gewichtetes Mittel von Rauchabsaugung ohne Regelung (4) und Natürliche Lüftung (1)	4. und 1.
	mit	12a	200 m um die aktive Punktabsaugung	Rauchabsaugung mit Regelung (5)	5.
		12b	Ausserhalb des Bereiches 200 m um die Punktabsaugung	Natürliche Lüftung (1)	1.
		12c	Betrachtung des gesamten Tunnels	Gewichtetes Mittel von Rauchabsaugung mit Regelung (5) und Natürliche Lüftung (1)	5. und 1.
Feste Punktabsaugung in Abständen zu einander bzw. zum Portal <200 m	ohne	13		Rauchabsaugung ohne Regelung (4)	4.
	mit	14		Rauchabsaugung mit Regelung (5)	5.

Abb. 4.39 Referenzgrad der Lüftungssysteme.

Lüftungssystem		Referenzgrad (Maximum = 1)	
1		1	
2		$\frac{\text{Schub Verfügbar}}{\text{Normkonformer Schub}}$	
3		$\frac{\text{Schub Verfügbar}}{\text{Normkonformer Schub}}$	
4		$\frac{\text{Absaugmenge Verfügbar}}{\text{Normkonforme Absaugmenge}}$	
5		$\frac{\text{Absaugmenge Verfügbar}}{\text{Normkonforme Absaugmenge}}$	
6	a	1	
	b	$\frac{\text{Schub Verfügbar}}{\text{Normkonformer Schub}}$	
7		$\frac{\text{Abluft [m}^3/\text{s, km]}}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
8	a	$\frac{\text{Abluft [m}^3/\text{s, km]}}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
	b	$\frac{\text{Absaugmenge Verfügbar}}{\text{Normkonforme Absaugmenge}}$	
9	a	1	
	b	$\frac{(\text{Abluft} - \text{Zuluft}) [\text{m}^3/\text{s, km}]}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
	c	$\frac{(\text{Abluft} - \text{Zuluft}) [\text{m}^3/\text{s, km}]}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
10	a	1	
	b	$\frac{(\text{Abluft} - \text{Zuluft}) [\text{m}^3/\text{s, km}]}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
	c	$\frac{(\text{Abluft} - \text{Zuluft}) [\text{m}^3/\text{s, km}]}{5[1/\text{km}] * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
11	a	$\frac{\text{Absaugmenge[m}^3/\text{s}]}{4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
	b	1	
	c	Rauch- absaugung ohne Regelung (4)	$\frac{\text{Anzahl Punktabsaugungen} * 200[\text{m}]}{\text{Tunnellänge[m]}} * \min\left(\frac{\text{Absaugmenge[m}^3/\text{s}]}{4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}; 1\right)$
		Natürliche Lüftung (1)	$\frac{\text{Tunnellänge[m]} - \text{Anzahl Punktabsaugungen} * 200[\text{m}]}{\text{Tunnellänge[m]}}$
12	a	$\frac{\text{Absaugmenge[m}^3/\text{s}]}{4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
	b	1	
	c	Rauch- absaugung mit Regelung (5)	$\frac{\text{Anzahl Punktabsaugungen} * 200[\text{m}]}{\text{Tunnellänge[m]}} * \min\left(\frac{\text{Absaugmenge[m}^3/\text{s}]}{4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}; 1\right)$
		Natürliche Lüftung (1)	$\frac{\text{Tunnellänge[m]} - \text{Anzahl Punktabsaugungen} * 200[\text{m}]}{\text{Tunnellänge[m]}}$
13		$\frac{\text{Summe der Absaugmenge[m}^3/\text{s}] * 200[\text{m}]}{\text{Abstand zwischen der ersten und letzten Absaugung [m]} * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	
14		$\frac{\text{Summe der Absaugmenge[m}^3/\text{s}] * 200[\text{m}]}{\text{Abstand zwischen der ersten und letzten Absaugung [m]} * 4[\text{m/s}] * \text{Tunnelquerschnitt[m}^2]}$	

Ein Beispiel für die Umsetzung auf nicht berechnete Lüftungssysteme wird im Folgenden gegeben.

Ausgangslage

Ein Tunnel mit einem Querschnitt von 40 m² verfügt über eine Querlüftung gemäss Lüftungsrichtlinien 1983 (Grundlagen der Belüftung von Strassentunnel, ASB, Mai 1983) mit einer Absaugmenge von 80 m³/s pro km.

Es wird keine Zuluft im Entrauchungsabschnitt zugeführt und es besteht keine Regelung der Längsgeschwindigkeit.

Zuordnung

Gemäss Abb. 4.38 handelt sich um eine Querlüftung. Da keine Luft zugeführt wird, ist Zuluft < Abluft und das System entspricht damit Nr. 9b in Abb. 4.38. Das Lüftungssystem kann damit auf das prizielle System „Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit“ Nr. 4 zurückgeführt werden.

Da gar keine Zuluft zugeführt wird, handelt es sich im Grunde bei dem System um eine Halbquerlüftung mit verteilter Absaugung, Nr. 7 in Abb. 4.38. Dies führt zum selben priziellen System der „Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit“ Nr. 4.

Beide Ansätze führen damit zum selben Referenzsystem.

Referenzgrad

Gemäss Abb. 4.39 kann der Referenzgrad für 9b wie folgt bestimmt werden:

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

Mit Abluft = 80 [m³/s,km], Zuluft = 0 [m³/s,km] und Tunnelquerschnitt=40[m²] ergibt sich der Referenzgrad zu:

$$\text{Referenzgrad} = (80 [m^3/s,km] - 0 [m^3/s,km]) / (5[1/km]*4[m/s]*40[m^2]) = 0.1$$

Für Nr. 7 (siehe Zuordnung) ergibt sich der selbe Referenzgrad unter Verwendung von:

$$\frac{\text{Abluft} [m^3/s, km]}{5[1/km] * 4[m/s] * \text{Tunnelquerschnitt}[m^2]}$$

Mit Abluft = 80 [m³/s,km] und Tunnelquerschnitt=40[m²] ergibt sich der Referenzgrad zu:

$$\text{Referenzgrad} = 80 [m^3/s,km] / (5[1/km]*4[m/s]*40[m^2]) = 0.1$$

Umsetzung

Es müssen zwei Risikoanalysen durchgeführt werden für:

- Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsgeschwindigkeit
- Natürliche Lüftung

Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung der folgenden Gewichtung zu aggregieren:

- 10% Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
- 90% Natürliche Lüftung.

Die 10% entsprechen dem Referenzgrad von 0.1.

Lüftungsstrategie

Bei der Auswahl des Lüftungssystems muss gleichzeitig deren Anwendung im Falle von Stau bestimmt werden.

Grundsätzlich bestehen folgende drei Varianten:

- Stauerkennung ist vorhanden: die Lüftungsstrategie für Stau wird nur bei Stau verwendet, ansonsten wird die Lüftungsstrategie für flüssigen Verkehr angesetzt.
- Unabhängig von der Verkehrsart (Stau oder Flüssig) wird stets die Lüftungsstrategie für Stau verwendet.
- Unabhängig von der Verkehrsart (Stau oder Flüssig) wird stets die Lüftungsstrategie für flüssigen Verkehr verwendet.

Lüftungsbetrieb

Zusammengefasst stehen 30 Kombinationen von Lüftungssysteme und Lüftungsstrategien zu Auswahl, siehe Abb. 4.48.

Kombinationen von Lüftungssystemen, Lüftungsstrategien, Verkehrsart und Verkehrsführung werden mit Kürzel bezeichnet; z.B. NLRFS: Natürliche Lüftung (NL). Richtungsverkehr (R), Flüssiger Verkehr (F), Strategie der Tunnellüftung mit der Annahme von Stau (S).

Staudetektion kann vorhanden sein oder auch nicht. Daher werden im Fall von Richtungsverkehr alle Kombinationsmöglichkeiten von Verkehrsart und Tunnellüftungsstrategie für jedes Tunnellüftungssystem berechnet.

- RSS: Richtungsverkehr Stau und Lüftungsstrategie für Stau;
- RSF: Richtungsverkehr Stau und Lüftungsstrategie für flüssigen Verkehr;
- RFS: Richtungsverkehr flüssig und Lüftungsstrategie für Stau;
- RFF: Richtungsverkehr flüssig und Lüftungsstrategie für flüssigen Verkehr.

Die Strategie relativ zur Verkehrsführung und Verkehrsart wird zusätzlich mit einer Zahl bezeichnet: 1 bis 6 in Abb. 4.40.

In der Tabelle ist auch der Bereich der Längsneigungsabhängigkeit angegeben:

- $8\% < i < 0\%$
Nur in diesem Bereich besteht eine Abhängigkeit von der Längsneigung. Bei Positiver Längsneigung sind keine Toten zu erwarten.
- $|i|$
Bedeutet, dass der Betrag der Längsneigung massgebend ist.

Zudem sind zwei Brandleistungen angegeben. Die erste Zahl (z.B. 0 MW bei 1_NLRFS) bedeutet, dass mit Verletzten bei Brandleistungen ab 0 MW zu rechnen ist; die zweite Zahl (z.B. 5 MW bei 1_NLRFS) gibt an, dass erst ab 5 MW mit Todesfällen durch den Brand zu rechnen ist.

Abb. 4.40 Lüftungsbetrieb in Abhängigkeit der Verkehrsführung, von Stau und der Lüftungsstrategie.

Verkehrsführung	Richtungsverkehr				Gegenverkehr	
	Flüssig	Stau	Flüssig	Stau	Flüssig	Stau
Verkehrsart Stau/Flüssig	Flüssig	Stau	Flüssig	Stau	Flüssig	Stau
Strategie Tunnellüftung	Stau	Flüssig	Flüssig	Stau	GV	
1. Natürliche Lüftung	1_NLRFS -8% < i < 0% 0 MW / 5 MW	2_NLRSF i 0 MW / 5 MW	3_NLRFF -8% < i < 0% 0 MW / 5 MW	4_NLRSS i 0 MW / 5 MW	5_NLGFG i 0 MW / 5 MW	6_NLGSG i 0 MW / 5 MW
2. Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	1_LORFS -8% < i < 0% 0 MW / 5 MW	2_LORSF i 0 MW / 5 MW	3_LORFF -8% < i < 0% 30 MW / 30 MW	4_LORSS i 0 MW / 5 MW	5_LOGFG i 0 MW / 5 MW	6_LOGSG i 0 MW / 5 MW
3. Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	1_LMRFS i 0 MW / 5 MW	2_LMRSF i 0 MW / 5 MW	3_LMRFF -8% < i < 0% 30 MW / 30 MW	4_LMRSS i 0 MW / 5 MW	5_LMGFG i 0 MW / 5 MW	6_LMGSG i 0 MW / 5 MW
4. Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	1_AORFS -8% < i < 0% 0 MW / 25 MW	2_AORSF i 0 MW / 30 MW	3_AORFF -8% < i < 0% 0 MW / 25 MW	4_AORSS i 0 MW / 30 MW	5_AOGFG i 0 MW / 30 MW	6_AOGSG i 0 MW / 30 MW
5. Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	1_AMRFS i 0 MW / 30 MW	2_AMRSF i 0 MW / 30 MW	3_AMRFF i 0 MW / 30 MW	4_AMRSS i 0 MW / 30 MW	5_AMGFG i 0 MW / 30 MW	6_AMGSG i 0 MW / 30 MW

Notbeleuchtung

Die Notbeleuchtung dient dazu, dem Tunnelbenutzer im Ereignisfall eine Hilfe zu geben, den nächst gelegenen Notausgang zu finden und die Fluchtgeschwindigkeit der Tunnelbenutzer zu erhöhen [68]. Das System sollte in der Lage sein, seine Aufgabe unter Brandbedingungen, starkem Rauch und bei Verlust der Stromversorgung (USV) zu erfüllen. Die Anforderung an das System ist, dass es eine unabhängige und/oder nichtunterbrechbare Stromversorgung im Ereignisfall gibt. Unterschiedliche Systeme zur Notbeleuchtung werden nicht unterschieden. Die Notbeleuchtung umfasst die Brandnotbeleuchtung nach Norm SIA197/2 sowie die Beleuchtung und Signalisation des Fluchtwegs (Evakuationsbeleuchtung).

In der Literatur sind die Effekte der Notbeleuchtung nur qualitativ beschrieben. Es ist unumstritten, dass die Notbeleuchtung einen positiven Effekt auf die Selbstrettung hat, es gibt bisher jedoch noch kein Modell, das es erlaubt diesen Effekt zu quantifizieren. Daher wird der Einfluss hier basierend auf Experteneinschätzungen festgelegt. Es wird geschätzt, dass durch das Vorhandensein einer Notbeleuchtung die Fluchtwahrscheinlichkeit um 10 % zunimmt. Diese geringe Zunahme kann dadurch begründet werden, dass der grösste Effekt der Notbeleuchtung dann besteht, wenn dichter Rauch vorhanden ist. Betrachtet man den zeitlichen Verlauf eines Ereignisses, kann angenommen werden, dass die Personen den Ereignisort bereits verlassen haben, bevor starker Rauch im Tunnel vorhanden ist.

Abb. 4.41 Faktor zur Berücksichtigung der Notbeleuchtung.

Notbeleuchtung	Einfluss auf die Konsequenzen
Ja	1.0
Nein	1.1

Ereignisdetektion

Eine Vielzahl verschiedener Überwachungssysteme für Tunnel sind verfügbar und in existierenden Tunneln bereits eingebaut. Generell und ohne die Vor- und Nachteile dieser Systeme detailliert zu berücksichtigen, können Ereignisdetektionssysteme eine schnellere Alarmierung ermöglichen und damit die Wahrscheinlichkeit der Selbstrettung von Personen erhöhen und sie ermöglichen auch den Einsatz von Brandfallszenariomanagern zur aktiven Kontrolle der Lüftung im Brandfall.

Da der Einfluss auf die Konsequenzen der verschiedenen Systeme bisher nicht bekannt ist, wird hier nur unterschieden, ob ein System vorhanden ist oder nicht. 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. Durch diesen Knoten wird berücksichtigt, ob ein Alarm erfolgreich ausgelöst werden kann. Der Einfluss des Alarms wird im Kapitel 4.2.4 beschrieben.

Zur Berücksichtigung der Effizienz der Systeme (schnelle System oder langsame Systeme) kann die Zeit zwischen Ausbruch eines Brandes und einer Tunnelsperrung berücksichtigt werden (siehe Gleichung (24)).

Ist die Zeit unbekannt, so kann für langsame Systeme eine Zeit von 300-600 Sekunden angenommen werden. Für schnelle Systeme kann eine Zeit von 60-120 Sekunden angenommen werden. Für normkonforme Systeme liegt die Zeit in der Regel bei 180 Sekunden.

Ist keine Ereignisdetektion vorhanden, so ist eine Zeit von 600 Sekunden zu berücksichtigen.

4.2.4 Modellierung der Ereignisse

In diesem Kapitel werden die prinzipiellen Ereignisse modelliert, die einen Einfluss auf das Risiko haben und berücksichtigt werden. Die Ereignisse sind in Abb. 4.42 zusammengestellt.

Abb. 4.42 Modellierung der Ereignisse.

Ereignisse	Verkehr	Fahrzeug pro Stunde
		Verkehrsqualität
		Fahrspurwechsel
		Fahrzeug pro km
		UMF Unfallmodifikationsfaktor
		BMF Brandmodifikationsfaktor
		Brandlast
		Schwere des Brandes
	Nebenanlagen	Alarm
		Technische Defekte an der Tunnelausstattung
	Tunnelnutzer	Flucht

Fahrzeuge pro Stunde

Der Knoten *Fahrzeuge pro Stunde* ist ein logischer Knoten im Bayes'schen Netz, der sich direkt aus der Verkehrsmenge, der Uhrzeit und der Tagesganglinie berechnet. Der Knoten *Fahrzeuge pro Stunde* enthält die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Fahrzeuge pro Stunde über den Tag verteilt.

Verkehrsqualität

Die Verkehrsqualität ist ein Indikator für die Güte des Verkehrsflusses. Dieser Knoten ist kein direktes Mass, welches für die Risikoermittlung verwendet wird und kann daher als informativer Knoten gesehen werden. Er hat jedoch einen Einfluss auf die Anzahl Fahrspurwechsel in einem Segment und der Indikator *Anzahl Fahrspurwechsel* wiederum ist ein direkter Indikator für die Unfallrate. Die folgenden Definitionen für die Verkehrsgüte werden verwendet:

Stufe A

Die Verkehrsteilnehmer werden äusserst selten von anderen beeinflusst. Sie besitzen die gewünschte Bewegungsfreiheit in dem Umfang, wie sie auf der Verkehrsanlage zugelassen ist. Der Verkehrsfluss ist frei.

Stufe B

Die Anwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer macht sich bemerkbar, bewirkt nur eine nur geringe Beeinträchtigung des Einzelnen. Der Verkehrsfluss ist nahezu frei.

Stufe C

Die individuelle Bewegungsmöglichkeit hängt vielfach vom Verhalten der übrigen Verkehrsteilnehmer ab. Die Bewegungsfreiheit ist spürbar eingeschränkt. Der Verkehrszustand ist stabil.

Stufe D

Der Verkehrsablauf ist gekennzeichnet durch hohe Belastungen, die zu deutlichen Beeinträchtigungen in der Bewegungsfreiheit der Verkehrsteilnehmer führen. Interaktionen zwischen ihnen finden nahezu ständig statt. Der Verkehrszustand ist noch stabil.

Stufe E

Es treten ständige gegenseitige Behinderungen zwischen den Verkehrsteilnehmern auf. Bewegungsfreiheit ist nur in sehr geringem Umfang gegeben. Geringfügige Verschlechterungen der Einflussgrössen können zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses führen. Der Verkehr bewegt sich im Bereich zwischen Stabilität und Instabilität. Die Kapazität wird erreicht.

Stufe F

Die Nachfrage ist grösser als die Kapazität. Die Verkehrsanlage ist überlastet.

Für diese Stufen gibt [69] Grenzwerte in Abhängigkeit der Fahrzeuge pro Stunde und der Anzahl an Fahrspuren an. Diese Grenzwerte sind in Abb. 4.43 zusammengestellt.

Abb. 4.43 Grenzwerte für Fahrzeuge pro Stunde in Abhängigkeit der Anzahl Fahrspuren für verschiedene Verkehrsqualitätsstufen.

	Fahrzeuge pro Stunde		
	1 Fahrspur	2 Fahrspuren	3 Fahrspuren
Stufe A	<= 700	<= 1170	<= 1650
Stufe B	<= 1800	<= 2090	<= 3025
Stufe C	<= 2200	<= 2850	<= 4125
Stufe D	<= 2800	<= 3420	<= 4950
Stufe E	<= 3200	<= 3800	<= 5500
Stufe F	> 3200	> 3800	> 5500

Fahrspurwechsel

Die Anzahl an Fahrspurwechseln hat einen entscheidenden Einfluss auf die Unfallrate. In Tunneln mit dichtem Verkehr, einem hohen Anteil an Schwerverkehr, langsamen Verkehr, grossen Längsneigungen, Ein- und Ausfahrten führen zu einer Zunahme an Fahrspurwechseln. Einige Simulationsmodelle sind vorhanden, um die Auswirkungen von Fahrspurwechseln zu untersuchen. Diese Simulationen basieren meist auf *cellular automaton* Modellen. Diese Modelle untersuchen den Einfluss von Fahrspurwechseln auf den Verkehrsfluss. Sie benötigen aber die Definition von Fahrspurwechselbedingungen, d.h. wann ein Fahrzeug sich für den Fahrspurwechsel entscheidet. Damit wird die Fahrspurwechselhäufigkeit bereits implizit modelliert. Modelle zur Beschreibung der Häufigkeit von Fahrspurwechseln unter speziellen Bedingungen fehlen noch.

Daher wird der Indikator *Fahrspurwechsel* hier zunächst als qualitativer Indikator verwendet. Der Indikator wird durch vier Zustände repräsentiert. Diese Zustände sind: keine Fahrspurwechsel, geringe Anzahl an Fahrspurwechsel, mittlere Anzahl an Fahrspurwechsel und hohe Anzahl an Fahrspurwechseln. Diese Zustände werden nicht weiter quantifiziert. Die Anzahl an Fahrspurwechseln in einem homogenen Segment ist abhängig von vielen unterschiedlichen Verkehrs- und Tunnelcharakteristiken.

Die folgenden Indikatoren haben die grösste Relevanz:

- Verkehrsbedingungen, repräsentiert durch die Verkehrsqualität;
- Anzahl an Fahrspuren;
- Anteil des Schwerverkehrs;
- Ein- und Ausfahrtsbedingungen.

Alle diese Aspekte interagieren und führen zu einem bestimmten Verhalten des Fahrers. Dieses wurde aufgrund von Experteneinschätzungen modelliert, mit denen ein additives Punktemodell entwickelt wurde.

Punktesysteme sind einfache Modellansätze, die viele Nachteile haben. Ein Nachteil ist, dass hypothetisch mögliche Kombinationen von Einflüssen nicht realistische Ergebnisse ergeben. In diesem Fall kann dies weitestgehend ausgeschlossen werden, da das normale Tunneldesign solche Kombinationen nicht zulässt.

Die Punkte repräsentieren die Tendenz für eine Zunahme von Fahrspurwechseln in einem Segment. Die Punkte sind in den folgenden Abbildungen gegeben. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl (sicherheitsrelevanter) Fahrspurwechsel minimal ist, wenn der Verkehr frei fliessen kann. Die Anzahl Fahrspurwechsel erreicht ein Maximum kurz bevor der Verkehr zusammenbricht. Bei Stausituationen nimmt die Anzahl Fahrspurwechsel wieder ab oder die Fahrspurwechsel finden bei einer sehr geringen Fahrgeschwindigkeit statt, so dass sie nicht sicherheitsrelevant sind. Dies wird durch die Punkte reflektiert, die in Abb. 4.44 gegeben sind.

Abb. 4.44 Bewertungspunkte der Verkehrsqualität.

Verkehrsqualität	Punkte
A	2
B	6
C	12
D	20
E	7
F	5

Auch die Anzahl Fahrspuren ist ein Schlüsselindikator für die Anzahl an Fahrspurwechseln.

Es ist offensichtlich, dass im Fall, in dem nur eine Fahrspur zur Verfügung steht, die Anzahl an Fahrspurwechseln gegen Null geht. Dies stellt eine Randbedingung des Punktesystems dar. Die Bewertungspunkte für die Anzahl Fahrspuren sind in Abb. 4.45 gegeben.

Abb. 4.45 Bewertungspunkte für die Anzahl der Fahrspuren.

Anzahl Fahrspuren	Punkte
1	0
2	4
3	2

Der Anteil an Schwerverkehr hat auch einen Einfluss auf die Fahrspurwechsel im Verkehr. Es kann davon ausgegangen werden, dass es einen Anstieg der Fahrspurwechsel bis zu einem Anteil von etwa 10-12 % gibt. Bis zu diesem Anteil werden die Personenwagen auch die rechte Fahrspur intensiv nutzen, jedoch häufig die Fahrspur wechseln müssen. Steigt der Anteil an Schwerverkehr weiter, so wird immer mehr die rechte Fahrspur gemieden und der Anteil an Fahrspurwechseln nimmt wieder ab. Dieser Einfluss wird durch die Bewertungspunkte reflektiert, die in Abb. 4.46 gegeben sind.

Abb. 4.46 Bewertungspunkte für den Anteil Schwerverkehr.

Anteil Schwerverkehr [%]	Punkte
0 - 1	1
1 - 2	2
2 - 3	3
3 - 4	4
4 - 5	4
5 - 6	5
6 - 7	5
7 - 8	6
8 - 9	6
9 - 10	7
10 - 11	7
11 - 12	8
12 - 13	8
13 - 14	8
14 - 15	10
15 - 16	10
16 - 17	10
17 - 18	8
18 - 20	7
20 - 24	6
24 - 26	5

In Ein- und Ausfahrtbereichen sind Fahrspurwechsel unbedingt notwendig. Diese Fahr-

spurwechsel führen auch zu einem Anstieg der Unfallrate. Die Unfallrate ist zudem Abhängig von der Länge der Ein- und Ausfahrten. Das verwendete Punktesystem für die Ein- und Ausfahrtbedingungen ist in Abb. 4.47 gegeben.

Abb. 4.47 Bewertungspunkte für verschiedene Ein- und Ausfahrtsbedingungen.

	Länge der Einfahrt	Länge der Ausfahrt	Punkte
Kein	-	-	0
Einfahrt	$0 \times l_{req}$	-	10
	$0.5 \times l_{req}$		8.75
	$1.0 \times l_{req}$		7.5
	$2.0 \times l_{req}$		5
Ausfahrt	-	$0 \times l_{req}$	10
		$0.5 \times l_{req}$	8.75
		$1.0 \times l_{req}$	7.5
		$2.0 \times l_{req}$	5
Kombination I	$0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	10
	$0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	8.75
	$0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	7.5
	$0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	5
	$0.5 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	8.75
	$0.5 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	7.5
	$0.5 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	6.25
	$0.5 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	3.75
	$1.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	7.5
	$1.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	6.25
	$1.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	5
	$1.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	2.5
	$2.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	5
	$2.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	3.75
	$2.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	2.5
	$2.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	0
Kombination II	$0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	10
	$0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	8.75
	$0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	7.5
	$0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	5
	$0.5 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	8.75
	$0.5 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	7.5
	$0.5 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	6.25
	$0.5 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	3.75

Abb. 4.47 Bewertungspunkte für verschiedene Ein- und Ausfahrtsbedingungen.

	Länge der Einfahrt	Länge der Ausfahrt	Punkte
	$1.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	7.5
	$1.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	6.25
	$1.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	5
	$1.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	2.5
	$2.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	5
	$2.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	3.75
	$2.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	2.5
	$2.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	0

Die totale Anzahl an Punkten ergibt sich aus der Summe der Punkte für die verschiedenen Bedingungen. Hierbei ist die Randbedingung zu beachten, dass es keine Fahrspurwechsel gibt, wenn nur eine Fahrspur vorhanden ist. Unter Verwendung dieser Punkte werden die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Zustände des Knotens wie folgt berechnet:

$$P_{Spurwechsel} [kcin] = \begin{cases} 1 & \text{Einfahrt/Ausfahrt} = \text{nein} \wedge \text{Spur} = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_{Spurwechsel} [gering] = \begin{cases} 1 - \frac{0.9}{20} (\text{Punkte} - 4) & 4 < \text{Punkte} \leq 24 \\ 0 & \text{Punkte} > 24 \end{cases} \quad (18)$$

$$P_{Spurwechsel} [mittel] = \begin{cases} 1 - P[gering] & 4 < \text{Punkte} < 24 \\ 0.8 & \text{Punkte} = 24 \\ 1 - P[hoch] & \text{Punkte} > 24 \end{cases} \quad (19)$$

$$P_{Spurwechsel} [hoch] = \begin{cases} 0 & \text{Punkte} < 24 \\ 0.1 + \frac{0.9}{20} (\text{Punkte} - 24) & \text{Punkte} \geq 24 \end{cases} \quad (20)$$

Dieses heuristische Model kann als Modul betrachtet werden, welches bei Bedarf in Zukunft ausgetauscht werden kann. Ein Schritt in diese Richtung kann [70] entnommen werden.

Statistiken aus Dänemark [71], [72] kann entnommen werden, dass ca. 10-15 % der Unfälle aus Fahrspurwechseln resultieren. Hieraus wurden die Unfallmodifikationsfaktoren entwickelt, die in Abb. 4.48 gegeben sind.

Abb. 4.48 UMF für die verschiedenen Zustände des Indikators Fahrspurwechsel.

Fahrspurwechsel	UMF
Kein	1.0
Gering	1.0
Mittel	1.1
Hoch	1.4

Fahrzeuge pro Kilometer

Die Fahrzeuge pro Kilometer werden aus den Fahrzeugen pro Stunde und der signalisier-ten Geschwindigkeit direkt berechnet.

Brandlast

Die vorhandene Brandlast im Tunnel kann als Indikator für die Schwere eines Brandes im Tunnel dienen. Gemäss anderen Ansätzen zur Modellierung von Bränden in Bauwerken, wird die Brandlast im Tunnel über die Anzahl an Fahrzeugen und die Brandlast der einzel-nen Fahrzeuge im Tunnel abgeschätzt. Mit Referenz zu [30] wird angenommen, dass die Brandlast eines Personenwagens zwischen 3000 – 7000 MJ beträgt und dass die Brand-last eines Lastwagens zwischen 88'000 MJ und 150'000 MJ liegt.

Ist der Anteil Schwerverkehr und die Anzahl Fahrzeuge bekannt, dann kann daraus die mittlere Brandlast pro Kilometer als Indikator für die Schwere des Brandes berechnet wer-den. Eine geringe Brandlast ist vorhanden, wenn die Brandlast bei 150'000 MJ/km liegt, eine mittlere Brandlast liegt bei rund 1'200'000 MJ/km, eine hohe Brandlast bei 2'500'000 MJ/km und eine sehr hohe Brandlast bei mehr als 2'500'000 MJ/km.

Schwere des Brandes

Die Brandleistung wird bei normalen Verkehrereignissen mit 4 Klassen repräsentiert, d.h. kein Brand, 5 MW Brand, 30 MW Brand und 100 MW Brand. Es wird angenommen, dass diese repräsentativen Klassen prinzipiell den gesamten Ereignisraum abbilden können. Der Knoten *Schwere des Brandes* ist abhängig vom Knoten *Brandlast*, vom Knoten *Mittelwert der Brandereignisrate infolge von Unfällen* und vom Knoten *Mittelwert der Brandereignisrate infolge von Spontanentzündungen*. Es gibt derzeit keine direkten Modelle, die in Abhängigkeit der theoretischen Brandlast im Tunnel auf die Schwere des Brandes schlies-sen können. Daher basieren hier die bedingten Wahrscheinlichkeiten auf Expertenein-schätzungen. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten sind in Abb. 4.49 bis Abb. 4.52 gege-ben.

Abb. 4.49 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Schwere des Brandes bei einer gerin-gen Brandlast.

Brandlast	150'000 MJ/km			
	Kein Brand		Brand	
Spontanentzündung	Kein Brand	Brand	Kein Brand	Brand
Kein Brand	1	0	0	0
5 MW	0	0.99	0.98	0.98
30 MW	0	0.01	0.18	0.18
100 MW	0	0	0.002	0.002

Abb. 4.50 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Schwere des Brandes bei einer mittleren Brandlast.

Brandlast	1'200'000 MJ/km			
Brand nach Unfall	Kein Brand		Brand	
Spontanentzündung	Kein Brand	Brand	Kein Brand	Brand
Kein Brand	1	0	0	0
5 MW	0	0.98	0.9	0.90
30 MW	0	0.02	0.08	0.08
100 MW	0	0	0.02	0.02

Abb. 4.51 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Schwere des Brandes bei einer grossen Brandlast.

Brandlast	2'500'000 MJ/km			
Brand nach Unfall	Kein Brand		Brand	
Spontanentzündung	Kein Brand	Brand	Kein Brand	Brand
Kein Brand	1	0	0	0
5 MW	0	0.85	0.77	0.77
30 MW	0	0.13	0.20	0.20
100 MW	0	0.02	0.03	0.03

Abb. 4.52 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Schwere des Brandes bei einer sehr grossen Brandlast.

Brandlast	< 2'500'000 MJ/km			
Brand nach Unfall	Kein Brand		Brand	
Spontanentzündung	Kein Brand	Brand	Kein Brand	Brand
Kein Brand	1	0	0	0
5 MW	0	0.8	0.72	0.72
30 MW	0	0.17	0.23	0.23
100 MW	0	0.03	0.05	0.05

Alarm

In verschiedenen Studien (z.B. [73]) wurde festgestellt, dass Tunnelbenutzer in der Regel versuchen, so lange wie möglich in ihren Fahrzeugen zu bleiben. Die Notwendigkeit zur Flucht wird meist erst sehr spät wahrgenommen. Klare Instruktionen durch Audio-visuelle Alarmeinrichtungen, durch Radioeinsprechung oder andere Kommunikationswege kann eine effiziente Massnahme sein, um die Wahrscheinlichkeit zur Selbstrettung zu erhöhen. Eine Alarmauslösung erfordert, dass generell ein Alarmsystem, wie beispielsweise eine Videoüberwachung, Brandmelder oder Rauchmelder, im Tunnel vorhanden ist. Die Bedingten Wahrscheinlichkeiten für den Knoten *Alarm* sind in Abb. 4.53 gegeben.

Abb. 4.53 Bedingte Wahrscheinlichkeiten für den Knoten Alarm.

	Monitoring	kein Monitoring
Kein Alarm	0.05	1
Alarm	0.95	0

Ein Alarm hat einen direkten Einfluss auf die Fluchtwahrscheinlichkeit. Der Einfluss eines Alarms auf die Basisfluchtwahrscheinlichkeiten wird mit 30 % abgeschätzt, d.h. die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Flucht aus dem Tunnel erhöht sich um 30 %.

Technische Defekte an der Tunnelausstattung

Jedes technische System kann infolge eines technischen Effekts ausfallen und im Ereignisfall nicht funktionsfähig sein. Jedes technische System hat eine spezifische Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit und eine generelle Aussage hierzu ist nicht direkt möglich. In der Regel kann in normal gewarteten Tunneln davon ausgegangen werden, dass die Zuverlässigkeit der Systeme hoch ist und keinen grossen Einfluss auf das Risiko haben wird. In [74] wird die Versagenswahrscheinlichkeit eines technischen Systems *on demand* in Strassentunneln mit 0.01 angegeben. Dieser Wert wird auch hier verwendet. Die technischen Defekte werden hier auf das Lüftungssystem bezogen. Gibt es einen technischen Defekt, so steht nur die Natürliche Lüftung zur Verfügung.

Gesamtlänge Tunnel

Es kann die Anzahl der Verletzten bzw. der Toten für beliebige Längenprofile ermittelt werden. Dafür werden die homogenen Segmente mit den lokalen Parametern betrachtet und später zusammengeführt. Hierbei ist die Gesamtlänge des Tunnels zu berücksichtigen.

Personenschaden durch Brand

Das Ziel ist, die Konsequenzen eines Tunnelbrandes ausgedrückt in Verletzten und Todesfällen zu ermitteln. Dabei ist das komplexe Zusammenspiel insbesondere zwischen Verkehr (Verkehrsmenge, Richtungsverkehr, Gegenverkehr, Stau, Schwerverkehrsanteil), Lüftungssystem, Lüftungsstrategie, Tunnelgeometrie (Länge, Längsneigung, Fahrspuren) und den Abständen zwischen den Notausgängen zu berücksichtigen.

Zur Berechnung wird hier ein zweiteiliges bestehendes Modell verwendet, das eine Strömungsberechnung und eine Fluchtwegsimulation beinhaltet.

Die Strömungsberechnungen werden mit dem Programm SPRINT (**S**moke **P**ropagation **I**N Tunnels) ausgeführt, welches die eindimensionale instationäre Strömung und Rauchausbreitung im Tunnel berechnet. Der Brand wird als Wärmequelle mit zeitlich variabler Energiefreisetzung modelliert, welcher proportional zur Brandleistung Schadstoffe freisetzt. Der Einfluss der Lüftungskomponenten, Kolbeneffekt, Rauchschichtung sowie die Rauchausbreitung gegen die Strömungsrichtung (Backlayering), werden berücksichtigt.

Für die Brandmodellierungen wird angenommen, dass die maximale Brandlast 10 Minuten nach Brandausbruch erreicht wird und, dass der Anstieg linear verläuft. Die Detektionszeit erfolgt in den Simulationen 60 s nachdem der Brand 5 MW erreicht hat. Zum Zeitpunkt der Branddetektion wird der Tunnel für die Einfahrt gesperrt und die Lüftungsanlage in Betrieb genommen. Detailliertere Beschreibungen finden sich in [52].

Mit Hilfe des Programmes ODEM (**O**ne-**D**imensional **E**gress **M**odel) wird das Fluchtverhalten der Personen im Tunnel berechnet. Die aus SPRINT erhaltenen Ergebnisse dienen dabei als Grundlage und liefern die zeitlich und örtlich variierenden Belastungen durch CO und Temperaturen. Mit standardisierten Verhaltensregeln wird das Fluchtverhalten der Personen simuliert und die dabei aufgenommenen Schadstoffbelastungen berechnet. Diese legen fest, ob eine Person als verletzt oder tot gilt.

Aus dem Ergebnis der beiden Programme wurde eine Antwortfläche generiert.

Dies ermöglicht es, zwischen den Ergebnissen zu interpolieren. Diese Interpolation erfolgt über eine Antwortfläche. Antwortflächen sind einfache Funktionen, die einen erklärenden Parameter x mit einer Antwort des Systems y funktional verknüpfen. Die Antwortfläche ermöglicht es dann, Ergebnisse aus dem gesamten Bereich der Parameter zu liefern. Man erhält mit einer Antwortfläche eine Art generisches Modell, dass eine Systemantwort gibt, ohne dass zusätzliche Simulationen notwendig sind.

Die erklärenden Variablen, die in der Entwicklung der Antwortfläche berücksichtigt werden konnten, sind in Abb. 4.54 zusammengestellt.

Abb. 4.54 Zusammenstellung der erklärenden Variablen.

Erklärende Variable	Einheit	Variable	Koeffizient	α Wert	Intervall
Längsneigung	[%]	x_1	β_1	α_1	[-100, 100]
Schwere des Brande Brandleistung	[MW]	x_2	β_2	α_2	[0,inf]
Abstand Notausgänge	[m]	x_3	β_3	α_3	[0, x_4]
Gesamtlänge des Tunnel	[m]	x_4	β_4	α_4	[0,inf]

Im Kontext der Entwicklung der Antwortfläche werden mittels einer multiplen Regressionsanalyse die Zusammenhänge zwischen den Indikator- und Zielvariablen beschrieben und modelliert. Die Simulationen bilden dabei einen bestimmten Bereich ab, der sich nicht beliebig weit extrapolieren lässt. Es wurde darauf geachtet, dass die in der Schweiz auftretenden Bereiche abgedeckt sind.

Bei der Längsneigung sind für einige Systeme Personenschäden nur bei einer negativen Neigung zu erwarten sind. In anderen Fällen hat der absolute Wert der Längsneigung einen Einfluss (siehe auch Abb. 4.40). Das ermöglicht es, den Parameter Längsneigung in der Antwortfläche als Absolutwert zu betrachten und durch einen weiteren Parameter g je nach System zu begrenzen, wobei g die Längsneigung repräsentiert.

Es hat sich zusätzlich gezeigt, dass nicht alle Brandleistungen zu Personenschäden führen. So führen beispielsweise kleinere Brände unter 5MW nicht zu Todesfällen. Bei einigen Lüftungssystemen bzw. -strategien ist auch bei grösseren Bränden nicht mit Todesfällen zu rechnen.

Daher wird die Gleichung für die Antwortfläche weiter durch einen Parameter f , der die Brandleistung repräsentiert, eingeschränkt:

$$P_j = \begin{cases} \min \left(\max \left(\left(\beta_0^j + \beta_1^j |x_1|^{\alpha_1} + \sum_{i=2}^4 \beta_i^j \cdot (x_i^j)^{\alpha_i} + E_j \right), 0 \right)^{\frac{1}{\alpha_{m,j}}}, 1 \right) & x_1 \geq g \quad x_2 \geq f \\ 0 & x_1 < g \quad \forall f \\ 0 & \forall g \quad x_2 < f \end{cases} \quad (21)$$

Die Zielvariablen sind in Abb. 4.55 zusammengestellt. Dabei beinhaltet der Personenschaden auch die Todesfälle. Für die Berechnung der Verletzten sind die Todesfälle abzuziehen.

Abb. 4.55 Zusammenstellung der Zielvariablen.

Zielvariable	Variable	α -Wert
Todesfallwahrscheinlichkeit	P_1	$\alpha_{5,1}$
Wahrscheinlichkeit eines Personenschadens	P_2	$\alpha_{5,2}$

Die Regressionskoeffizienten wurden für jedes Lüftungssystem und jede der beschriebenen Lüftungsstrategien gemäss Abb. 4.40 berechnet. Insgesamt ergeben sich damit für die Todesfallwahrscheinlichkeit und die Wahrscheinlichkeit für einen Personenschaden je 30 Regressionsgleichungen. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse, die β -Werte, die α -Werte sowie die Werte für g und f , sind in Abb. 4.56 bis Abb. 4.61 gegeben. Der Wert ε repräsentiert den Fehlerterm.

	1 AMRFS	1 AORFS	1 LMRSF	1 LORFS	1 NLRFS
1 Konstante	$\beta_0 = 1.677E-01$	$\beta_0 = -5.322E-01$	$\beta_0 = 1.103E-02$	$\beta_0 = -1.013E+00$	$\beta_0 = -1.013E+00$
x_1 Längsneigung [%]	$\beta_1 = 2.504E-02$	$\beta_1 = 1.911E-02$	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 1.069E-01$	$\beta_1 = 1.069E-01$
x_2 Brandlast [MW]	$\beta_2 = 8.687E-02$	$\beta_2 = 1.849E-02$	$\beta_2 = 1.075E-01$	$\beta_2 = 7.001E-02$	$\beta_2 = 7.001E-02$
x_3 Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 = 0.000E+00$	$\beta_3 = 8.342E-08$	$\beta_3 = 4.367E-02$	$\beta_3 = 8.247E-02$	$\beta_3 = 8.247E-02$
x_4 Länge [m]	$\beta_4 = -6.223E-05$	$\beta_4 = 4.675E+00$	$\beta_4 = -8.321E-04$	$\beta_4 = 4.343E+00$	$\beta_4 = 4.343E+00$
P_2 P(Personenschaden) [1/Ereignis]	$\alpha_1 = 0.50$	$\alpha_1 = 1.00$	$\alpha_1 = 0.50$	$\alpha_1 = 0.50$	$\alpha_1 = 0.50$
ϵ Residual [-]	$\alpha_2 = 0.30$	$\alpha_2 = 0.50$	$\alpha_2 = 0.30$	$\alpha_2 = 0.30$	$\alpha_2 = 0.30$
ϵ Residual [-]	$\alpha_3 = 3.00$	$\alpha_3 = 2.00$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$
ϵ Residual [-]	$\alpha_4 = 1.00$	$\alpha_4 = -0.30$	$\alpha_4 = 0.70$	$\alpha_4 = -0.30$	$\alpha_4 = -0.30$
ϵ Residual [-]	$\alpha_5 = 0.30$	$\alpha_5 = 0.30$	$\alpha_5 = 0.70$	$\alpha_5 = 0.50$	$\alpha_5 = 0.50$
ϵ Residual [-]	$\epsilon = 0.103403$	$\epsilon = 0.1233367$	$\epsilon = 0.1089976$	$\epsilon = 0.1560734$	$\epsilon = 0.15607343$
f Brandlast [MW]	0	0	0	0	0
g Längsneigung [%]	0	-10	0	0	0

	2 AMRSF	2 AORSF	2 LMRSF	2 LORSF	2 NLRSF
1 Konstante	$\beta_0 = -2.135E-01$	$\beta_0 = -2.278E-01$	$\beta_0 = -4.122E-01$	$\beta_0 = -4.122E-01$	$\beta_0 = -7.148E-01$
x_1 Längsneigung [%]	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 1.839E-04$	$\beta_1 = 1.693E-06$	$\beta_1 = 1.693E-06$	$\beta_1 = 0.000E+00$
x_2 Brandlast [MW]	$\beta_2 = 4.120E-02$	$\beta_2 = 4.193E-02$	$\beta_2 = 3.914E-02$	$\beta_2 = 3.914E-02$	$\beta_2 = 7.820E-02$
x_3 Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 = 6.791E-03$	$\beta_3 = 7.675E-03$	$\beta_3 = 1.825E-02$	$\beta_3 = 1.825E-02$	$\beta_3 = 5.082E-03$
x_4 Länge [m]	$\beta_4 = 4.654E+01$	$\beta_4 = 4.745E+01$	$\beta_4 = 1.667E+01$	$\beta_4 = 1.667E+01$	$\beta_4 = 6.994E+00$
P_2 P(Personenschaden) [1/Ereignis]	$\alpha_1 = 4.00$	$\alpha_1 = 2.00$	$\alpha_1 = 4.00$	$\alpha_1 = 4.00$	$\alpha_1 = 4.00$
ϵ Residual [-]	$\alpha_2 = 0.30$				
ϵ Residual [-]	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.50$
ϵ Residual [-]	$\alpha_4 = -0.70$	$\alpha_4 = -0.70$	$\alpha_4 = -0.50$	$\alpha_4 = -0.50$	$\alpha_4 = -0.30$
ϵ Residual [-]	$\alpha_5 = 1.00$	$\alpha_5 = 1.00$	$\alpha_5 = 2.00$	$\alpha_5 = 2.00$	$\alpha_5 = 1.00$
ϵ Residual [-]	$\epsilon = 0.0626332$	$\epsilon = 0.0640567$	$\epsilon = 0.0762751$	$\epsilon = 0.0762751$	$\epsilon = 0.09844689$
f Brandlast [MW]	0	0	0	0	0
g Längsneigung [%]	-10	-10	-10	-10	-10

Abb. 4.56 Antwortflächen für die definierten Strategien 1 und 2 für Personenschäden

		3 AMRFF					3 AORFF					3 LMRFF					3 LORFF					3 NLRFF				
1	Konstante		$\beta_0=$	1.266E-01		$\beta_0=$	-5.322E-01		$\beta_0=$	-6.146E-02		$\beta_0=$	-6.146E-02		$\beta_0=$	-6.146E-02		$\beta_0=$	-6.146E-02		$\beta_0=$	-1.013E+00		$\beta_0=$	-1.013E+00	
X_1	Längsneigung [%]		$\beta_1=$	6.878E-07	$\alpha_1=$	4.00	$\beta_1=$	1.911E-02	$\alpha_1=$	1.00	$\beta_1=$	8.060E-03	$\alpha_1=$	1.00	$\beta_1=$	8.060E-03	$\alpha_1=$	1.00	$\beta_1=$	8.060E-03	$\alpha_1=$	1.00	$\beta_1=$	1.069E-01	$\alpha_1=$	0.50
X_2	Brandlast [MW]		$\beta_2=$	2.168E-02	$\alpha_2=$	0.50	$\beta_2=$	1.849E-02	$\alpha_2=$	0.50	$\beta_2=$	1.720E-04	$\alpha_2=$	1.00	$\beta_2=$	1.720E-04	$\alpha_2=$	1.00	$\beta_2=$	1.720E-04	$\alpha_2=$	1.00	$\beta_2=$	7.001E-02	$\alpha_2=$	0.30
X_3	Abstand Notausgänge [m]		$\beta_3=$	0.000E+00	$\alpha_3=$	3.00	$\beta_3=$	8.342E-08	$\alpha_3=$	2.00	$\beta_3=$	4.832E-04	$\alpha_3=$	0.70	$\beta_3=$	4.832E-04	$\alpha_3=$	0.70	$\beta_3=$	4.832E-04	$\alpha_3=$	0.70	$\beta_3=$	8.247E-02	$\alpha_3=$	0.30
X_4	Länge [m]		$\beta_4=$	-3.363E-05	$\alpha_4=$	1.00	$\beta_4=$	4.675E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	4.343E+00	$\alpha_4=$	-0.30
P_2	P(Personenschaden) [1/Ereignis]		$\beta_4=$	-3.363E-05	$\alpha_4=$	1.00	$\beta_4=$	4.675E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	-2.999E-03	$\alpha_4=$	0.30	$\beta_4=$	4.343E+00	$\alpha_4=$	-0.30
I	Residual [-]		$\epsilon=$	0.0653143	$\alpha_5=$	0.30	$\epsilon=$	0.1233367	$\alpha_5=$	0.30	$\epsilon=$	0.0671114	$\alpha_5=$	0.50	$\epsilon=$	0.0671114	$\alpha_5=$	0.50	$\epsilon=$	0.0671114	$\alpha_5=$	0.50	$\epsilon=$	0.15607343	$\alpha_5=$	0.50
f	Brandlast [MW]			0		0		0		0		30		30		30		30		30		0		0		0
g	Längsneigung [%]			0		0		-10		-10		0		0		0		0		0		0		0		0

		4 AMRSS					4 AORSS					4 LMRSS					4 LORSS					4 NLRSS				
1	Konstante		$\beta_0=$	-1.797E-01		$\beta_0=$	-2.278E-01		$\beta_0=$	-6.992E-01		$\beta_0=$	-7.148E-01		$\beta_0=$	-7.148E-01		$\beta_0=$	-7.148E-01		$\beta_0=$	-7.148E-01		$\beta_0=$	-7.148E-01	
X_1	Längsneigung [%]		$\beta_1=$	0.000E+00	$\alpha_1=$	0.30	$\beta_1=$	1.839E-04	$\alpha_1=$	2.00	$\beta_1=$	2.290E-06	$\alpha_1=$	4.00	$\beta_1=$	0.000E+00	$\alpha_1=$	0.30	$\beta_1=$	0.000E+00	$\alpha_1=$	0.30	$\beta_1=$	0.000E+00	$\alpha_1=$	0.30
X_2	Brandlast [MW]		$\beta_2=$	3.602E-02	$\alpha_2=$	0.30	$\beta_2=$	4.193E-02	$\alpha_2=$	0.30	$\beta_2=$	7.618E-02	$\alpha_2=$	0.30	$\beta_2=$	7.820E-02	$\alpha_2=$	0.30	$\beta_2=$	7.820E-02	$\alpha_2=$	0.30	$\beta_2=$	7.820E-02	$\alpha_2=$	0.30
X_3	Abstand Notausgänge [m]		$\beta_3=$	4.177E-03	$\alpha_3=$	0.30	$\beta_3=$	7.675E-03	$\alpha_3=$	0.30	$\beta_3=$	4.692E-03	$\alpha_3=$	0.50	$\beta_3=$	5.082E-03	$\alpha_3=$	0.50	$\beta_3=$	5.082E-03	$\alpha_3=$	0.50	$\beta_3=$	5.082E-03	$\alpha_3=$	0.50
X_4	Länge [m]		$\beta_4=$	4.202E+01	$\alpha_4=$	-0.70	$\beta_4=$	4.745E+01	$\alpha_4=$	-0.70	$\beta_4=$	6.873E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30
P_2	P(Personenschaden) [1/Ereignis]		$\beta_4=$	4.202E+01	$\alpha_4=$	-0.70	$\beta_4=$	4.745E+01	$\alpha_4=$	-0.70	$\beta_4=$	6.873E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30	$\beta_4=$	6.994E+00	$\alpha_4=$	-0.30
I	Residual [-]		$\epsilon=$	0.0583658	$\alpha_5=$	1.00	$\epsilon=$	0.0640567	$\alpha_5=$	1.00	$\epsilon=$	0.0931418	$\alpha_5=$	1.00	$\epsilon=$	0.0984469	$\alpha_5=$	1.00	$\epsilon=$	0.0984469	$\alpha_5=$	1.00	$\epsilon=$	0.09844689	$\alpha_5=$	1.00
f	Brandlast [MW]			0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
g	Längsneigung [%]			-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10		-10

Abb. 4.57 Antwortflächen für die definierten Strategien 3 und 4 für Personenschäden.

	5 AMGFG	5 AOGFG	5 LMGFG	5 LOGFG	5 NLGFG
1 Konstante	$\beta_0 = 1.526E-01$	$\beta_0 = 8.230E-02$	$\beta_0 = 2.435E-01$	$\beta_0 = -2.190E-01$	$\beta_0 = -2.190E-01$
x_1 Längsneigung [%]	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 1.538E-03$	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 3.570E-03$	$\beta_1 = 3.570E-03$
x_2 Brandlast [MW]	$\beta_2 = 8.989E-02$	$\beta_2 = 9.031E-02$	$\beta_2 = 8.531E-02$	$\beta_2 = 6.639E-02$	$\beta_2 = 6.639E-02$
x_3 Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 = 4.034E-03$	$\beta_3 = 5.905E-03$	$\beta_3 = 1.680E-02$	$\beta_3 = 5.494E-04$	$\beta_3 = 5.494E-04$
x_4 Länge [m]	$\beta_4 = -5.280E-04$	$\beta_4 = -2.847E-05$	$\beta_4 = -3.118E-02$	$\beta_4 = 1.922E+00$	$\beta_4 = 1.922E+00$
P_2 P(Personenschaden) [1/Ereignis]	$\alpha_1 = 4.00$	$\alpha_1 = 1.00$	$\alpha_1 = 4.00$	$\alpha_1 = 0.50$	$\alpha_1 = 0.50$
P_1 Residual [-]	$\alpha_2 = 0.30$				
f Brandlast [MW]	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.70$	$\alpha_3 = 0.70$
g Längsneigung [%]	$\alpha_4 = 0.70$	$\alpha_4 = 1.00$	$\alpha_4 = 0.30$	$\alpha_4 = -0.30$	$\alpha_4 = -0.30$
	$\alpha_5 = 1.00$	$\alpha_5 = 1.00$	$\alpha_5 = 2.00$	$\alpha_5 = 2.00$	$\alpha_5 = 2.00$
	$\epsilon = 0.0578491$	$\epsilon = 0.0558197$	$\epsilon = 0.0540805$	$\epsilon = 0.0389412$	$\epsilon = 0.03894116$
	0	0	0	0	0
	-10	-10	-10	-10	-10

	6 AMGSG	6 AOGSG	6 LMGSSG	6 LOGSSG	6 NLGSSG
1 Konstante	$\beta_0 = -1.797E-01$	$\beta_0 = -2.278E-01$	$\beta_0 = -7.037E-01$	$\beta_0 = -7.148E-01$	$\beta_0 = -7.148E-01$
x_1 Längsneigung [%]	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 1.839E-04$	$\beta_1 = 6.396E-03$	$\beta_1 = 0.000E+00$	$\beta_1 = 0.000E+00$
x_2 Brandlast [MW]	$\beta_2 = 3.602E-02$	$\beta_2 = 4.193E-02$	$\beta_2 = 7.612E-02$	$\beta_2 = 7.820E-02$	$\beta_2 = 7.820E-02$
x_3 Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 = 4.177E-03$	$\beta_3 = 7.675E-03$	$\beta_3 = 4.722E-03$	$\beta_3 = 5.082E-03$	$\beta_3 = 5.082E-03$
x_4 Länge [m]	$\beta_4 = 4.202E+01$	$\beta_4 = 4.745E+01$	$\beta_4 = 6.803E+00$	$\beta_4 = 6.994E+00$	$\beta_4 = 6.994E+00$
P_2 P(Personenschaden) [1/Ereignis]	$\alpha_1 = 0.30$	$\alpha_1 = 2.00$	$\alpha_1 = 0.50$	$\alpha_1 = 0.30$	$\alpha_1 = 0.30$
P_1 Residual [-]	$\alpha_2 = 0.30$				
f Brandlast [MW]	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.30$	$\alpha_3 = 0.50$	$\alpha_3 = 0.50$	$\alpha_3 = 0.50$
g Längsneigung [%]	$\alpha_4 = -0.70$	$\alpha_4 = -0.70$	$\alpha_4 = -0.30$	$\alpha_4 = -0.30$	$\alpha_4 = -0.30$
	$\alpha_5 = 1.00$				
	$\epsilon = 0.0583658$	$\epsilon = 0.0640567$	$\epsilon = 0.0924879$	$\epsilon = 0.0984469$	$\epsilon = 0.09844689$
	0	0	0	0	0
	-10	-10	-10	-10	-10

Abb. 4.58 Antwortflächen für die definierten Strategien 5 und 6 für Personenschäden.

		1 AMRFS					1 AORFS					1 LMRFS					1 LORFS					1 NLRFS				
1	Konstante		$\beta_0=$	$\alpha_1=$																						
x_1	Längsneigung	[%]	$\beta_1=$	$\alpha_2=$																						
x_2	Brandlast	[MW]	$\beta_2=$	$\alpha_3=$																						
x_3	Abstand Notausgänge	[m]	$\beta_3=$	$\alpha_4=$																						
x_4	Länge	[m]	$\beta_4=$	$\alpha_5=$																						
P_1	P(Todesfall)	[1/Ereignis]	$\epsilon=$																							
I	Residual	[-]	25	0	30	-10	5	0	5	-10	5	0	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10
f	Brandlast	[MW]																								
g	Längsneigung	[%]																								

		2 AMRFS					2 AORFS					2 LMRFS					2 LORFS					2 NLRFS				
1	Konstante		$\beta_0=$	$\alpha_1=$																						
x_1	Längsneigung	[%]	$\beta_1=$	$\alpha_2=$																						
x_2	Brandlast	[MW]	$\beta_2=$	$\alpha_3=$																						
x_3	Abstand Notausgänge	[m]	$\beta_3=$	$\alpha_4=$																						
x_4	Länge	[m]	$\beta_4=$	$\alpha_5=$																						
P_1	P(Todesfall)	[1/Ereignis]	$\epsilon=$																							
I	Residual	[-]	30	-10	30	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10	5	-10
f	Brandlast	[MW]																								
g	Längsneigung	[%]																								

Abb. 4.59 Antwortflächen für die definierten Strategien 1 und 2 für Todesfälle.

		3 AMRFF		3 AORFF		3 LMRFF		3 LORFF		3 NLRFF	
1	Konstante	$\beta_0 =$									
x_1	Längsneigung [%]	$\beta_1 =$									
x_2	Brandlast [MW]	$\beta_2 =$									
x_3	Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 =$									
x_4	Länge [m]	$\beta_4 =$									
P_1	P(Todesfall) [1/Ereignis]	$\alpha_1 =$									
I	Residual [-]	$\alpha_2 =$									
f	Brandlast	$\alpha_3 =$									
g	Längsneigung [%]	$\alpha_4 =$									
		$\alpha_5 =$									
		$\epsilon =$									
		25	30	30	30	30	30	30	30	5	0
		0	-10	0	0	0	0	0	0	5	0

		4 AMRSS		4 AORSS		4 LMRSS		4 LORSS		4 NLRSS	
1	Konstante	$\beta_0 =$									
x_1	Längsneigung [%]	$\beta_1 =$									
x_2	Brandlast [MW]	$\beta_2 =$									
x_3	Abstand Notausgänge [m]	$\beta_3 =$									
x_4	Länge [m]	$\beta_4 =$									
P_1	P(Todesfall) [1/Ereignis]	$\alpha_1 =$									
I	Residual [-]	$\alpha_2 =$									
f	Brandlast	$\alpha_3 =$									
g	Längsneigung [%]	$\alpha_4 =$									
		$\alpha_5 =$									
		$\epsilon =$									
		30	30	5	5	5	5	5	5	5	5
		-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10

Abb. 4.60 Antwortflächen für die definierten Strategien 3 und 4 für Todesfälle.

Aus den Antwortflächen lässt sich direkt die Wahrscheinlichkeit berechnen, dass eine Person bei einem Brandereignis zu Schaden kommt. Anhand von zwei prinzipiellen Systemen soll die Anwendung gezeigt werden.

Beim ersten System 3 AORFF (Absaugung ohne Kontrolle der Längsgeschwindigkeit in einem Tunnel mit Richtungsverkehr mit der Strategie Flüssig bei flüssigem Verkehr) wird angenommen, dass die Tunnellänge 2000 m beträgt und der Tunnel Notausgänge im Abstand von 250 m hat. Mit diesen Annahmen kann die zweidimensionale Antwortfläche in Abhängigkeit der Brandleistung und der Längsneigung mit den zuvor angegebenen Gleichungen berechnet werden. Die Antwortfläche ist in Abb. 4.62 dargestellt.

Deutlich wird, dass bei diesem System die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden generell gering ist. Bei geringer Längsneigung ist erst bei grossen Brandlasten mit Personenschäden zu rechnen.

Erkennbar ist auch, dass bei einem grossen Gradienten (hier – 8 %) die Absaugung weniger effizient ist und die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden fast linear mit der Brandlast steigt. Dies ist auf Kamineffekte zurückzuführen.

Direkt angewendet werden kann die Antwortfläche mit der folgenden Formel:

$$P_{\text{Personenschaden}}^{\text{AORFF}} = \min \left(\max \left(\left(\frac{-0.532 + 0.0191 \cdot |x_1| + 0.0185 \cdot x_2^{0.5} + 8.32 \cdot 10^{-8} \cdot 250^2 + 4.675 \cdot 2000^{-0.3}}{} \right)^{\frac{1}{0.3}}, 0 \right), 1 \right)$$

Wobei x_1 die Längsneigung ist und x_2 die Brandlast repräsentiert. Die anderen Werte in der Gleichung sind Abb. 4.57 zu entnehmen. Für eine Längsneigung von – 6 % und eine Brandlast von 200 MW ergibt sich:

$$P_{\text{Personenschaden}}^{\text{AORFF}} = \min \left(\max \left(\left(\frac{-0.532 + 0.0191 \cdot |-6| + 0.0185 \cdot 200^{0.5} + 8.32 \cdot 10^{-8} \cdot 250^2 + 4.675 \cdot 2000^{-0.3}}{} \right)^{\frac{1}{0.3}}, 0 \right), 1 \right)$$

$$P_{\text{Personenschaden}}^{\text{AORFF}} = 0.02379$$

Deutlich wird aus Abb. 4.62, dass bei diesem System die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden generell gering ist. Bei geringer Längsneigung ist erst bei grossen Brandleistungen mit Personenschäden zu rechnen.

Erkennbar ist auch, dass bei einem grossen Gradienten (hier - 8 %) die Absaugung weniger effizient ist und die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden fast linear mit der Brandleistung steigt. Dies ist auf Kamineffekte zurückzuführen.

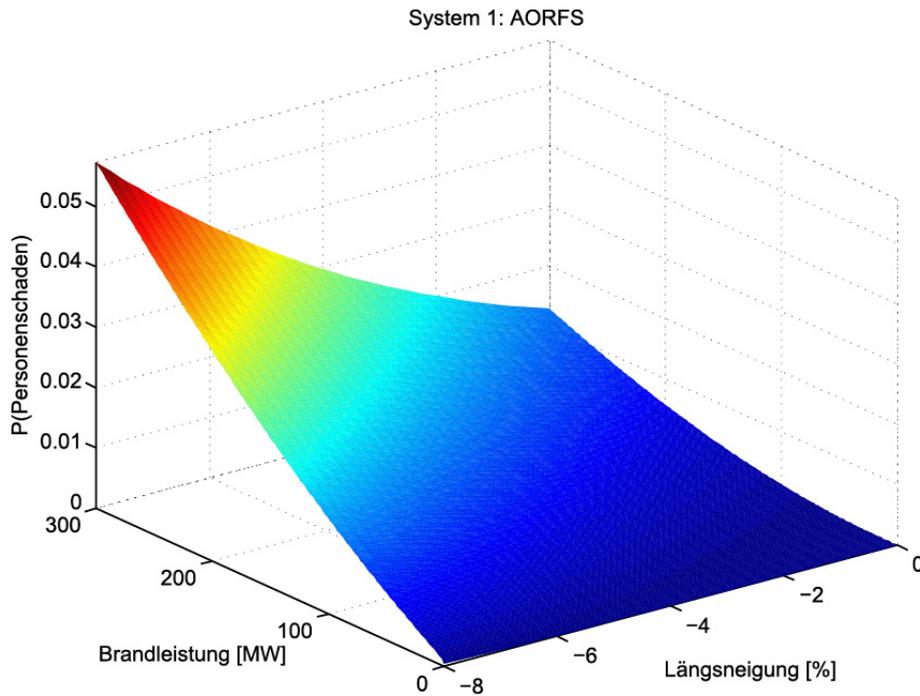


Abb. 4.62 Antwortfläche für das System AORFF für eine Tunnellänge von 2000 m und einem Abstand der Notausgänge von 250 m.

Zum Vergleich ist die Antwortfläche für ein zweites prinzipielles System LORFS (Längslüftung ohne Kontrolle der Längsgeschwindigkeit) dargestellt. Die Verkehrsart ist flüssig und die Lüftungsstrategie ist Stau, d.h. es wird die falsche Strategie gewählt.

Die Antwortfläche ist in Abb. 4.63 dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass sich die Form der Antwortfläche bei diesem System von dem System AORFF deutlich unterscheidet. Auch ist das Niveau der Wahrscheinlichkeit für Personenschäden deutlich höher.

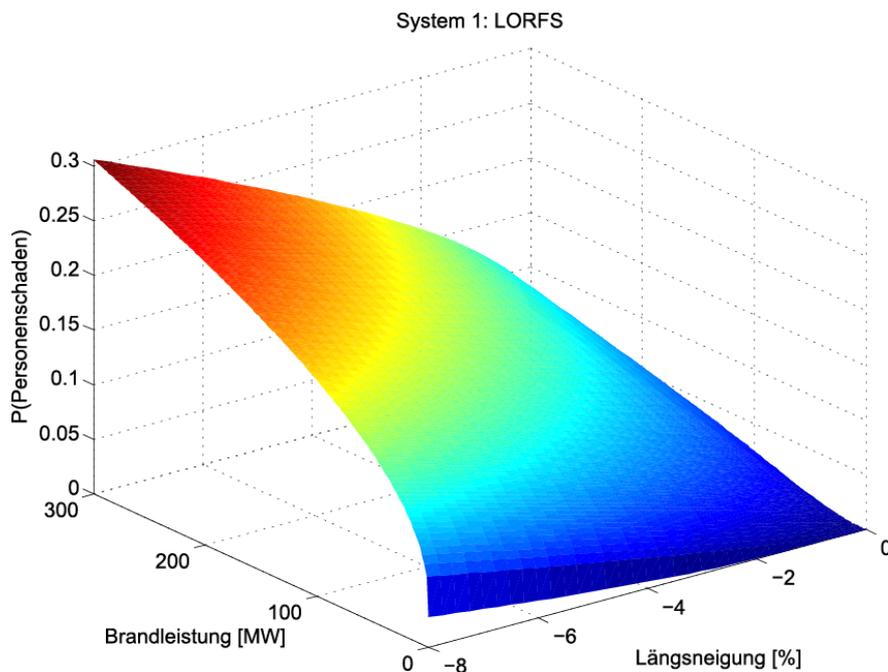


Abb. 4.63 Antwortfläche für das System LORFS für eine Tunnellänge von 2000 m und einem Abstand der Notausgänge von 250 m.

Zur Illustration des Einflusses des Abstands der Notausgänge ist in Abb. 4.64 die Antwortfläche bei einer Brandleistung von 150 MW und einer Längsneigung von -3 % für das System AORFF dargestellt.

Die rote Line stellt den Mittelwert dar, die blauen gestrichelten Linien repräsentieren die Modellunsicherheiten.

Es ist erkennbar, dass bis zu einem Abstand der Notausgänge von ca. 600 m der Einfluss des Abstandes der Notausgänge relativ konstant bleibt. Wird der Abstand Notausgänge darüber hinaus vergrössert, so steigt auch deutlich die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden.

Der Einfluss des Abstands Notausgänge für das System LORFS ist in Abb. 4.65 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Abstand der Notausgänge in diesem System eine grosse Bedeutung hat und ein kurzer Abstand zwischen Notausgängen einen signifikanten Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit für Personenschäden hat. Dies ist bei einer Längslüftung durchaus plausibel.

Insgesamt zeigt die Anwendung der Antwortflächen,

- dass für sehr spezifische Systeme und Bedingungen im Tunnel eine einfache Möglichkeit geschaffen wurde, die Personenrisiken abzuschätzen,
- die Anwendung einfach ist und keine weiteren CFD und Fluchtwegsimulationen erforderlich sind,
- die Ergebnisse plausibel sind und den Erwartungen an die Leistungsfähigkeit der Systeme entsprechen.

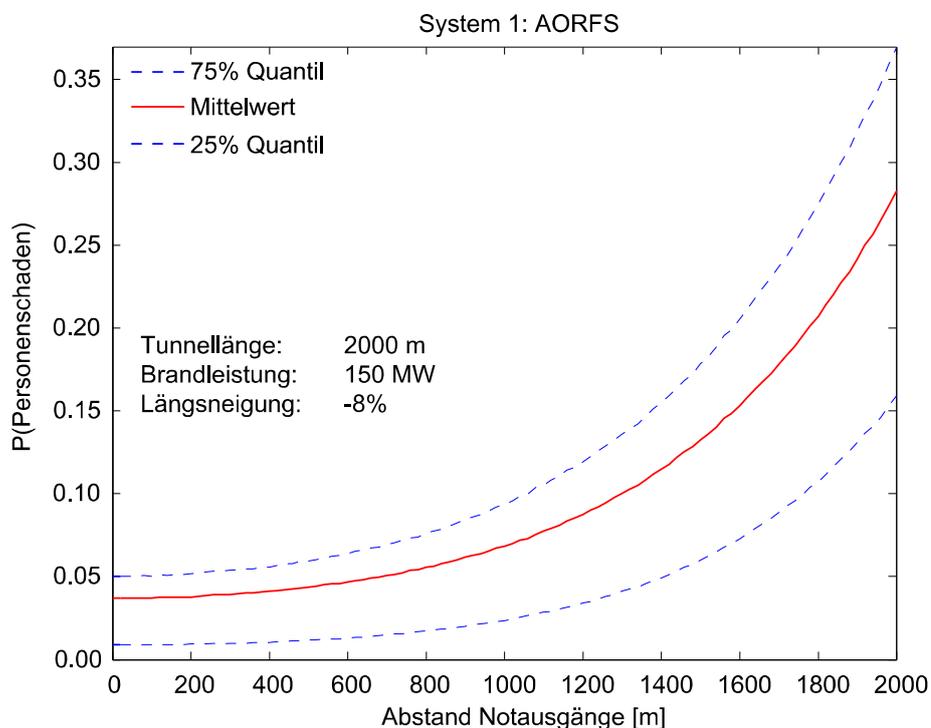


Abb. 4.64 Antwortfläche für das System AORFF für eine Tunnellänge von 2000 m, einer Brandleistung von 150 MW und einer Längsneigung von -8 %.

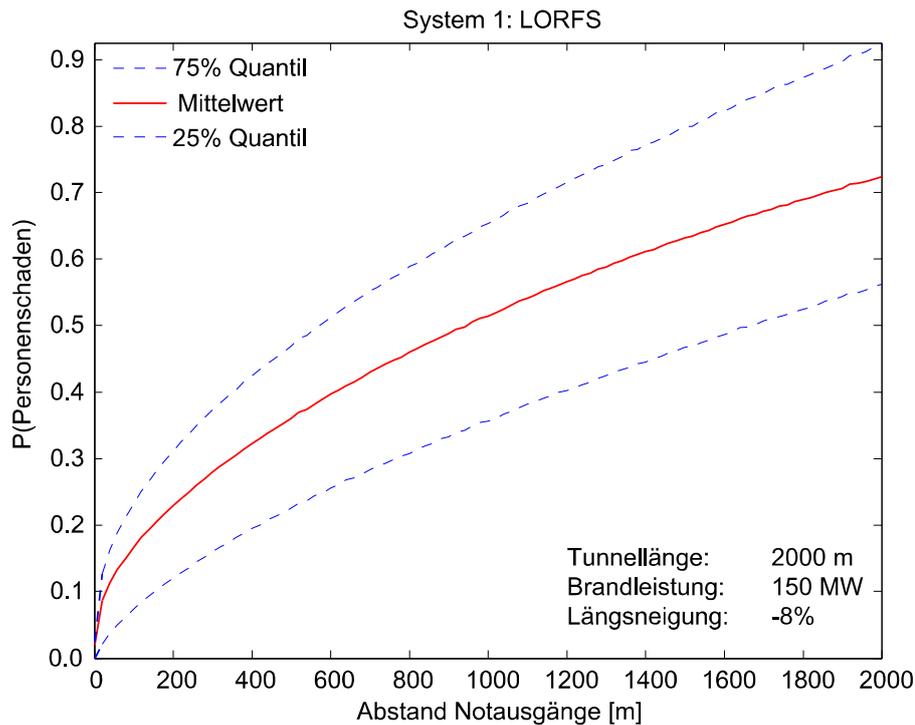


Abb. 4.65 Antwortfläche für das System LORFS für eine Tunnellänge von 2000 m, einer Brandleistung von 150 MW und einer Längsneigung von -3 %.

Mit den Antwortflächen kann die Anzahl der Verletzten bzw. der Toten für beliebige Längenprofile ermittelt werden. Dafür werden einzelne Abschnitte mit den lokalen Parametern betrachtet und später zusammengeführt.

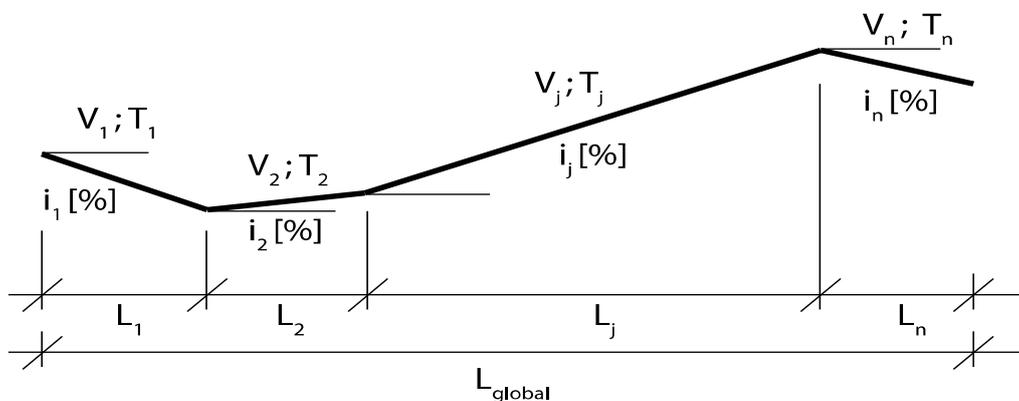


Abb. 4.66 Beispiel eines Tunnels mit beliebiger Längenprofil mit 4 Tunnelabschnitten

Es hat sich herausgestellt, dass die globale Länge des Tunnels einen wichtigen Parameter zur Ermittlung der Anzahl Verletzten und Toten spielt. Darum fließt neben den lokalen Parametern die globale Länge in die Auswertung der Verletzten/Toten pro Abschnitt ein. Mit diesem Ansatz wird jeder Abschnitt zunächst als gerader Tunnel mit der globalen Gesamtlänge berechnet. Die Resultate der einzelnen Teilgebiete fließen proportional zur lokalen Länge L_i in das Ergebnis des gesamten Tunnels ein:

$$V_T = \sum_{j=1}^n V_j \frac{L_j}{L_{Global}}$$

$$T_T = \sum_{j=1}^n T_j \frac{L_j}{L_{Global}}$$

V_T = Anzahl der Verletzten, V_j = Anzahl Verletzte des Abschnitts i

T_T = Anzahl der Toten, T_j = Anzahl Tote des Abschnitts i

L_{Global} = Länge des gesamten Tunnels, L_j = Länge des Abschnittes j

4.2.5 Modellierung der Konsequenzen

Im Bayes'schen Netz werden die folgenden Konsequenzen berücksichtigt:

Abb. 4.67 Modellierung der Konsequenzen.

Konsequenzen	Unfälle	Verteilung der Unfall-, Verletzten- und Todesfallrate infolge von Unfällen
		Mittelwert der Unfall-, Verletzten- und Todesfallrate infolge von Unfällen
	Brände	Mittelwert der Brandereignisrate infolge von Unfällen und Spontanentzündungen
		Anzahl Todesfälle und Verletzte infolge von Bränden

Verteilung der Unfall-, Verletzten- und Todesfallrate infolge von Unfällen

Die Verteilung der Unfallrate, der Verletztenrate und der Todesfallrate werden direkt aus dem Knoten UMF berechnet. Als Grundlage dienen die Basisraten, die im Kapitel 4.2.2 gegeben ist.

Die Verteilungen der Raten werden im Bayes'schen Netz berechnet, jedoch nicht für den Entscheidungsprozess verwendet. Sie kann bei Bedarf angegeben werden.

Die Verteilung ist abhängig vom Knoten *Zone* und von der signalisierten Geschwindigkeit.

Mittelwert der Unfall-, Verletzten- und Todesfallrate infolge von Unfällen

Die Mittelwerte der Raten dienen der Berechnung des Erwartungswerts der Anzahl Unfälle, der gemäss Kapitel 4.2.2 berechnet werden kann. Diese Werte dienen der Entscheidungsfindung und der Prüfung der Akzeptanz gemäss Kapitel 5. Der Mittelwert der Ereignisraten ist die Entscheidungsgrundlage für mögliche Massnahmen.

Der Knoten ist im Bayes'schen Netz nicht unbedingt notwendig, da der Mittelwert auch direkt über die Verteilung der Ereignisraten leicht berechnet werden kann. Hier wurden die Knoten aus Gründen der gesamten Architektur des Netzes eingeführt. Der Mittelwert der Raten ist ein direktes Ergebnis aus dem Bayes'schen Netz. Die Raten werden direkt berechnet, wenn Evidenz über die einzelnen Indikatoren im Bayes'schen Netz eingefügt wird. Details zur Inferenzberechnung im Bayes'schen Netz sind im Anhang III gegeben.

Unter Verwendung der Unfallraten kann der Mittelwert der Anzahl Unfälle direkt berechnet werden unter Verwendung der Gleichungen zu den Unfallrelativzahlen in Kapitel 4.2.2.

Mittelwert der Brandereignisrate infolge von Unfällen und Spontanentzündungen

Der Knoten *Mittelwert der Brandereignisrate* infolge von Unfällen ist direkt abhängig von der Unfallrate und dem Anteil Schwerverkehr. Der Einfluss des Schwerverkehrs wird wie folgt mit einem linearen Modell, basierend auf den Basisbrandereignisraten in Kapitel 4.2.2, Abb. 4.5 und der Basisunfallrate berücksichtigt:

$$P_{fire}(HGV) | Unfälle = 3.729 \cdot 10^{-2} \cdot [1 - (HGV/100)] + 7.458 \cdot 10^{-2} \cdot (HGV/100) \quad 0 \leq HGV \leq 26 \quad (22)$$

Hierin bezeichnet $P_{fire} | Unfälle (HGV)$ die Wahrscheinlichkeit eines Brandes, gegeben, es geschieht ein Unfall in Abhängigkeit des Schwerverkehrs. Ist der Anteil des Schwerverkehrs Null, so liegt die Wahrscheinlichkeit eines Brandes nach einem Unfall bei 3.73 % und steigt an bis auf 4.7 % bei einem Anteil Schwerverkehr von 26 %.

Auch die Brandereignisrate infolge spontaner Entzündung ist vom Anteil des Schwerverkehrs abhängig. Legt man die Daten aus Kapitel 4.2.2, Abb. 4.5 für die spontane Entzündung durch technische Defekte zugrunde, so ergibt sich eine lineare Funktion der Brandereignisrate in Abhängigkeit vom Schwerverkehr:

$$\lambda_{fire} | HGV = 4.369 \cdot 10^{-9} \cdot [1 - (HGV/100)] + 1.5292 \cdot 10^{-8} \cdot (HGV/100) \quad 0 \leq HGV \leq 26 \quad (23)$$

Anzahl Todesfälle und Verletzte infolge von Bränden

Mit den Antwortflächen kann die Anzahl der Verletzten bzw. der Todesfälle für beliebige Längenprofile ermittelt werden. Dafür werden einzelne Abschnitte mit den lokalen Parametern betrachtet und später zusammengeführt. Die Anzahl Verletzte kann aus der Wahrscheinlichkeit für eine verletzte Person multipliziert mit der Anzahl Personen im Tunnel ermittelt werden. Die Anzahl Personen im gesamten Tunnel bei flüssigem Verkehr berechnen sich zu:

$$N_{P,F} = [(x_4 / (v \cdot 1000)) + t_s] \cdot N_{Fzg/km} \cdot N_\beta \cdot v \cdot N_{Richtung} \quad (24)$$

Hierin ist x_4 die Gesamtlänge des Tunnels, v die signalisierte Geschwindigkeit, t_s die Zeit von Brandausbruch bis zur Tunnelsperrung, $N_{Fzg/km}$ die Anzahl an Fahrzeugen pro Kilometer, $N_{Richtung}$ berücksichtigt ob der Verkehr im Richtungsverkehr ($N_{Richtung} = 1$) oder im Gegenverkehr ($N_{Richtung} = 2$) geführt wird und N_β die mittlere Anzahl Personen pro Fahrzeug.

Im Staufall ist die Anzahl an Personen im Tunnel wie folgt zu berechnen:

$$N_{P,S} = [1000 / (7 \cdot (1 + HGV))] \cdot (x_4 / 1000) \cdot N_{Spur} \cdot N_\beta \cdot N_{Richtung} \quad (25)$$

Hierin ist x_4 die Gesamtlänge des Tunnels, N_{Spur} die Anzahl Fahrspuren und N_β die mittlere Anzahl Personen pro Fahrzeug und HGV der Anteil Schwerverkehr. Für t_s in Gleichung (24) kann 180/3600 Stunden angesetzt werden, und N_β kann zu 1.3 angenommen werden.

Die erwartete Anzahl an Todesfällen im flüssigen Verkehr $E[N_{Tot,F}]$ berechnet sich zu:

$$E[N_{Tot,F}] = P_I \cdot N_{P,F} \quad (26)$$

Die erwartete Anzahl an Todesfällen im Stau $E[N_{Tot,S}]$ berechnet sich zu:

$$E[N_{Tot,S}] = P_1 \cdot N_{P,S} \quad (27)$$

Die erwartete Anzahl an Verletzten im flüssigen Verkehr $E[N_{Verl,F}]$ berechnet sich zu:

$$E[N_{Verl,F}] = \max((P_2 - P_1) \cdot N_{P,F}, 0) \quad (28)$$

Die erwartete Anzahl an Verletzten im Stau $E[N_{Verl,S}]$ berechnet sich zu:

$$E[N_{Verl,S}] = \max((P_2 - P_1) \cdot N_{P,S}, 0) \quad (29)$$

P_1, P_2 sind gemäss Gleichung (21) für den jeweiligen Fall zu berechnen.

4.3 Gefahrgutereignisse

In diesem Kapitel wird die Risikoermittlung bei Gefahrgutunfällen dargestellt. Die Grundlagen entsprechen der ASTRA Dokumentation [24]. Im Rahmen des Projektes „ADR Tunnel“ hat das ASTRA ein Vorgehen und eine zugehörige Methodik entwickelt [24], um eine einheitliche Umsetzung der Forderung gemäss ADR 2007 zu ermöglichen und dabei auch die Anforderungen der StfV zu berücksichtigen. Die vorliegende Dokumentation und die Dokumentation ASTRA 84002 sind unabhängig voneinander anzuwenden. Für Gefahrgutereignisse und die Entscheidungsfindung diesbezüglich ist die Dokumentation ASTRA 84002 massgebend. Die Gefahrgutrisiken werden hier berücksichtigt, um alle Risiken infolge des Strassenverkehrs abbilden zu können und den Effekt von risikoreduzierenden Massnahmen im Tunnel umfänglich abzubilden.

4.3.1 Risikoermittlung der Gefahrgutereignisse mit Bayes'schem Netz

Analog zu den allgemeinen Verkehrsrisiken werden auch die Risiken infolge von Gefahrgütern mit einem Bayes'schen Netz berechnet. Das Bayes'sche Netz besteht aus 15 Indikatorvariablen, beschreibt 8 generelle Ereignisse und berücksichtigt 6 verschiedene Typen von Konsequenzen. Das Bayes'sche Netz ist in Abb. 4.68 dargestellt. Die Indikatoren sind in Orange, die Ereignisse in Gelb und die Konsequenzen in Blau dargestellt.

Dieses Netz ist generell relativ einfach, wenn man zunächst nur die Ereignisvariablen betrachtet. Der Knoten *Gefahrgutszenarien* enthält alle Szenarien, die in [24] definiert sind. Von diesem Knoten aus gehen alle drei generellen Verknüpfungen zu den repräsentativen Gefahrenereignissen, das heisst Lachenbrand, Explosion und Toxizität. Gegeben, eines dieser Ereignisse tritt ein, wird im Bayes'schen Netz die Todesfallrate, beziehungsweise die Verletztenrate berechnet.

Diese Rate wird dann verwendet, um in Abhängigkeit der Verkehrsmenge und der Anzahl an Personen in einem bestimmten Abschnitt im Tunnel die Anzahl Todesfälle und die Anzahl an Verletzten zu berechnen.

Um die prinzipiellen Szenarien und Konsequenzen zu berechnen, werden 15 Indikatorvariablen verwendet, viele davon sind die gleichen, die auch bei der Modellierung der Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen verwendet werden (siehe Kapitel 4.2). Die Eigenschaften der Knoten im Netz werden in Abb. 4.69 beschrieben. Die Basis für die Modellierung bilden weitestgehend die Modelle aus [55] und [24] sowie Simulationen zur Berechnung der Effizienz der Lüftung. Diese Grundlagen und Modelle werden in den folgenden Kapiteln angegeben. Die Berechnung im Bayes'schen Netz erfolgt automatisch, sobald die Informationen über die Indikatoren im Netz als Evidenz berücksichtigt sind. Die Ergebnisse können direkt ausgelesen werden.

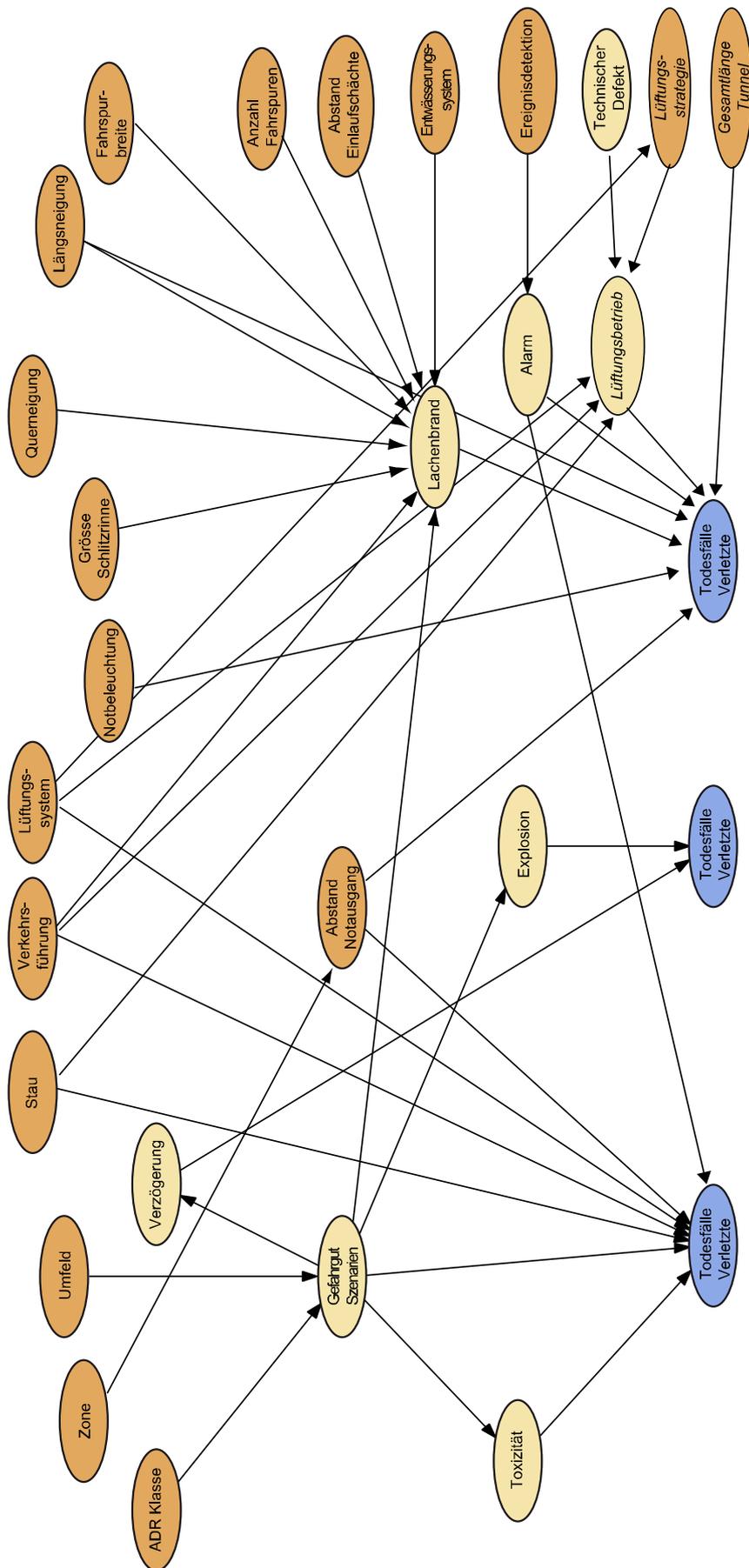


Abb. 4.68 Bayes'sches Netz zur Berechnung der Risiken infolge Gefahrgutereignisse.

Abb. 4.69 Beschreibung der Knoten des Gefahrgutmodells.

	Knoten	Beschreibung	Grösse [Zustände x Bedingungen]	Zustände
Bauwerk	Tunnelklasse	Tunnelklasse gemäss ADR.	5 x 1	Tunnel Kat. A Tunnel Kat. B Tunnel Kat. C Tunnel Kat. D Tunnel Kat. E
	Grösse Schlitzrinne	Beschreibt die Öffnungsgrösse der Schlitzrinne in cm.	11 x 1	3, 4, ..., 10, 12, 14, 16
	Querneigung	Querneigung der Fahrbahn.	17 x 1	0, 0.5, ..., 8
	Abstand der Einlaufschächte	Abstand der Einlaufschächte bei diskreten Entwässerungssystemen.	11 x 1	20, 25, ..., 40, 50, ..., 100
	Entwässerungssystem	Unterscheidet, ob diskrete Einlaufschächte oder Schlitzrinnen vorhanden sind.	3 x 1	Kein Entwässerungssystem
				Diskrete Einlaufschächte
Kontinuierliche Schlitzrinne				
Ereignisse	Verzögerung	Zeitspanne zwischen Unfall und Gefahrgutwirkung nach OECD/PIARC CH Modell in [s].	8 x 12	0, 60, 90, 120, 180, 300, 600, 900
	Gefahrgut-szenarien	Gefahrgutszenarien nach OECD/PIARC.	12 x 840	Kein Gefahrgutunfall
				BLEVE 50 kg Propangas-Zylinder
				Lachenbrand Benzin
				Explosion Benzindämpfe
				Chlorfreisetzung aus Tank (20 t)
BLEVE Propangas Tank (18 t)				
Gaswolkenbrand Propangas Tank (18 t)				
Fackelbrand Propangastank (18 t)				
Ammoniakfreisetzung aus Tank (18 t)				
Acoleinfreisetzung aus Tank (25 t)				
Acoleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)				
BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)				
Lachenbrand Schlitzrinne	Ereignisgrösse, wenn eine Schlitzrinne vorhanden ist in [MW].	6 x 272'646	0, 50, 100, 150, 200, 300	
Lachenbrand Einläufe	Ereignisgrösse, wenn Einlaufschächte vorhanden sind in [MW].	6 x 272'646	0, 50, 100, 150, 200, 300	

Abb. 4.69 Beschreibung der Knoten des Gefahrgutmodells.

	Knoten	Beschreibung	Grösse [Zustände x Bedingungen]	Zustände
	Flucht Lachenbrand	Modelliert die Flucht- wahrscheinlichkeit.	2 x 260'928	Flucht keine Flucht
	Toxizität	Ereignisgrösse	4 x 12	Keine Gering Mittel Hoch
	Explosion	Ereignisgrösse	4 x 12	Keine Gering Mittel Hoch
	Lachenbrand	Ereignisgrösse in [MW].	6 x 216	0, 50,100,150,200,300
Ereignisse	Todesfälle Ver- letzte Toxizität	Modelliert die Wahr- scheinlichkeit, dass eine Person verletzt wird.	3 x 27'840	Unverletzt Verletzt Tod
	Todesfälle Ver- letzte Explosion	Modelliert die Wahr- scheinlichkeit, dass eine Person verletzt wird.	3 x 24	Unverletzt Verletzt Tod
	Todesfälle Ver- letzte Lachenbrand	Modelliert die Wahr- scheinlichkeit, dass eine Person verletzt wird.	3 x 6'013'440	Unverletzt Verletzt Tod

4.3.2 Modellierung der Indikatoren

Zur Modellierung der Gefahrgutereignisse werden viele Indikatoren verwendet, die auch für Ereignisse infolge des normalen Verkehrsgeschehens verwendet werden. Diese Indikatoren sind im Kapitel 4.2 bereits beschrieben und werden hier nicht wiederholt. Dieses Kapitel enthält nur die zusätzlichen Indikatoren, die in Abb. 4.70 zusammengestellt sind.

Abb. 4.70 Zusätzliche Indikatoren für das Gefahrgutmodell.

Indikatoren	Verkehr	ADR Klasse
	Bauwerk	Quergefälle
		Entwässerungssysteme
		Abstand Einlaufschächte
		Grösse der Schlitzrinne
	Nebenanlagen	Lüftungssysteme

ADR Klasse

Das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse, bekannt als ADR, reguliert den Transport von Gefahrgütern. Dabei unterscheidet die ADR 9 unterschiedliche Klassen. Diese Klassen sind in Abb. 4.71 angegeben.

Abb. 4.71 Gefahrgutklassen nach ADR.

Klasse	Beschreibung
1	Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoffen
2	Gase
3	Entzündbare flüssige Stoffe
4.1	Entzündbare feste Stoffe, selbstzersetzende Stoffe und desensibilisierte explosive Stoffe
4.2	Selbstentzündliche Stoffe
4.3	Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln
5.1	Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe
5.2	Organische Peroxide
6.1	Giftige Stoffe
6.2	Ansteckungsgefährliche Stoffe
7	Radioaktive Stoffe
8	Ätzende Stoffe
9	Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände

Basierend auf diesen generellen Kategorien wurden Durchfahrtsbeschränkungen durch Tunnel erlassen. Fünf verschiedene Kategorien von Durchfahrtsbeschränkungen werden unterschieden (A-E). Diese sind in Abb. 4.72 angegeben (vgl. auch [24]).

Abb. 4.72 Tunnelkategorien gemäss SDR [6]

Kategorie	Beschränkung
A	keine Beschränkung für gefährliche Güter
B	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer sehr grossen Explosion führen können
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr grossen Explosion, • grossen Explosion, • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe führen können
D	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr grossen Explosion • grossen Explosion • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe • grossen Brand führen können
E	Beschränkungen für alle gefährlichen Güter ausser UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373

Mit dieser Regulierung können verschiedene Szenarien nahezu vollständig im Tunnel vermieden werden, d.h. die Eintretenswahrscheinlichkeit dieser Szenarien kann signifikant reduziert werden.

Es wird angenommen, dass die Beschränkung nicht von allen Gefahrguttransportern tatsächlich berücksichtigt wird und der Tunnel trotz der Restriktion benutzt wird. Es wird angenommen, dass 5 % aller Fahrzeuge diese Restriktion nicht beachtet. Damit ergeben sich die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Szenarien gemäss Abb. 4.73.

Abb. 4.73 Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Szenario trotz Beschränkung in einen bestimmten Tunnel vorkommt.

[#]	Szenario	Kat. A	Kat. B	Kat. C	Kat. D	Kat. E
3	BLEVE eines LPG (50 kg Zylinder)	1	1	1	0.05	0.05
4	Lachenbrand Treibstoffe (28 t)	1	1	1	0.05	0.05
5	Explosion Benzindämpfe (28 t)	1	1	1	0.05	0.05
6	Chlorfreisetzung (20 t)	1	1	0.05	0.05	0.05
7	BLEVE LPG aus Tank (18 t)	1	0.05	0.05	0.05	0.05
8	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	1	0.05	0.05	0.05	0.05
9	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	1	0.05	0.05	0.05	0.05
10	Ammoniakfreisetzung (18 t)	1	1	0.05	0.05	0.05
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	1	1	0.05	0.05	0.05
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	1	1	1	0.05	0.05
13	BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)	1	1	0.05	0.05	0.05

Umfeld

Gemäss [24] sind die Ereignisraten von Gefahrgutereignissen abhängig vom Umfeld. Das Umfeld wird durch die DTV und den Typ der Zeitvariationskurve des Verkehrs beschrieben.

Die Unterscheidung zwischen ländlich und städtisch ist in Abb. 4.74 gegeben.

Abb. 4.74 Unterscheidung zwischen ländlichen und städtischen Tunneln.

Bedingungen	Städtisch	Ländlich
DTV <= 3500 Fzg/d		X
TVC Typ A und DTV > 3500	X	
TVC Typ B und DTV > 3500	X	
TVC Typ C und DTV > 3500		X
TVC Typ D und DTV > 3500		X
TVC Typ E und DTV > 3500	X	
TVC Typ F und DTV > 3500	X	

Quergefälle

Der Knoten *Quergefälle* ist ein massgebender Indikator für die Ereignisgrösse eines Lachenbrandes, da er zusammen mit dem Längsgefälle, der Fahrspurbreite und der Anzahl Fahrspuren bestimmt, wie gross eine Lache potentiell werden kann. Das Quergefälle wird als Absolutwert berücksichtigt.

Entwässerungssysteme

Drei unterschiedliche Typen von Entwässerungssystemen werden unterschieden: Schlitzrinnen, Einlaufschächte und keine Entwässerung. Das Entwässerungssystem hat einen direkten Einfluss auf die Grösse einer potentiellen Lache bei einem Austritt von Treibstoffen aus einem Gefahrentransport und damit einen entscheidenden Einfluss auf die potentielle Brandleistung bei einem Lachenbrand.

Abstand Einlaufschächte

Sind Einlaufschächte im Tunnel vorhanden, so bestimmt die Kapazität der Einlaufschächte entscheidend. Es wird angenommen, dass die Kapazität ausreichend ist, um auslaufende Flüssigkeit vollständig aufzunehmen und, dass nur ein kleiner Teil über den Einlaufschacht läuft.

Damit wird die Kapazität der Einlaufschächte nur auf den Abstand der Einlaufschächte bezogen. Für den Fall, dass die Kapazität der Schächte nicht ausreicht für die Aufnahme der austretenden Flüssigkeit, so ist ein äquivalenter Abstand zu bestimmen (siehe auch Kapitel 4.3.3).

Die Definition des Abstandes zwischen zwei Einlaufschächten ist in Abb. 4.75 dargestellt

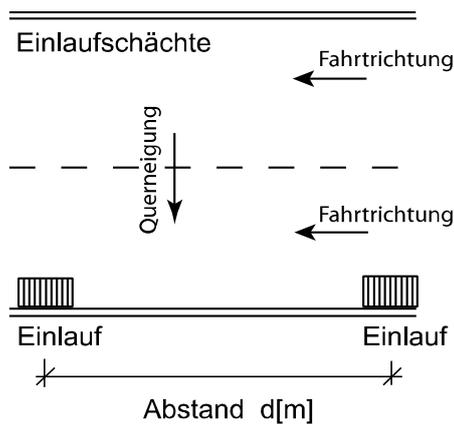


Abb. 4.75 Definition des Abstandes zwischen Einlaufschächten.

Grösse der Schlitzrinne

Ist eine Schlitzrinne im Tunnel vorhanden, so ist für die Lachengrösse, die sich potentiell entzünden kann, die Öffnungsgrösse des Schlitzes entscheidend. In Abb. 4.76 sind zwei prinzipielle Typen von Schlitzrinnen dargestellt. x entspricht in Abb. 4.76 der Öffnungsgrösse des Schlitzes.

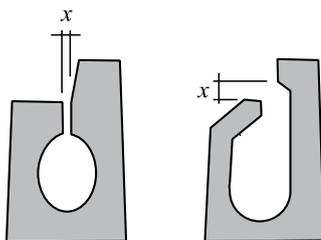


Abb. 4.76 Beispiele verschiedener Schlitzrinnentypen.

Der Einfluss der Grösse der Schlitzrinne auf die Brandleistung des Lachenbrandes ist in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

4.3.3 Modellierung der Ereignisse

Im Gefahrgutmodell werden die prinzipiellen Szenarien als Gefahrgutereignisse aus [55] berücksichtigt. Nach einem Ereignis wird die Verzögerung des Ereignisses berücksichtigt, das einen Einfluss auf die Intensität der drei generellen Ereignisse Toxizität, Explosion und Lachenbrand hat. Diese prinzipiellen Ereignisse im Gefahrgutmodell sowie das Fluchereignis sind in Abb. 4.77 zusammengestellt.

Abb. 4.77 Zusammenstellung der Ereignisse im Gefahrgutmodell.

Ereignisse	Unfälle	Gefahrgutereignisse
		Verzögerung
		Toxizität
		Explosion
	Lachenbrand	
	Tunnelnutzer	Flucht

Gefahrgutereignisse

Die Gefahrgutereignisse, die hier berücksichtigt werden, entsprechen denjenigen, die in [24] spezifiziert sind. In Abb. 4.78 sind die Ereignisraten pro Fahrzeugkilometer für die spezifischen Szenarien gegeben. Das Szenario 6 wird in [24] nicht berücksichtigt, da es für die Schweiz nicht plausibel erscheint. Dennoch wurde hier dieses Szenario mit einer sehr kleinen Rate berücksichtigt, da es eventuell ein repräsentatives Szenario für andere Stoffe ist, die in der Schweiz relevant sind.

Abb. 4.78 Berücksichtigte Szenarien und Ereignisrate pro Fahrzeugkilometer gemäss [24].

[#]	Szenario	ADR-CH [pro Fahrzeugkilometer]	
		Städtisch	Ländlich
3	BLEVE eines LPG (50 kg Zylinder)	1.17E-12	1.47E-12
4	Lachenbrand Treibstoffe (28 t)	8.23E-10	1.02E-09
5	Explosion Benzindämpfe (28 t)	2.45E-10	2.98E-10
6	Chlorfreisetzung (20 t)	1.75E-14	1.75E-14
7	BLEVE LPG aus Tank (18 t)	1.17E-12	1.47E-12
8	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	3.85E-11	4.90E-11
9	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	1.14E-10	1.42E-10
10	Ammoniakfreisetzung (18 t)	4.73E-10	5.95E-10
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	4.73E-09	5.95E-09
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	4.73E-09	5.95E-09
13	BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)	1.17E-12	1.47E-12

Der Anteil an transportierten Stoffen gemäss [24], die zu den relevanten Szenarien führen (Standardverteilung nach [24]), ist in Abb. 4.79 gegeben.

Abb. 4.79 Anteil der Transportierten Stoffe, die zu den relevanten Szenarien führen gemäss [24].

[#]	Szenario	Anteil transportierteStoffe
	Kein relevantes Szenario	5.80E-01
3	BLEVE eines LPG (50 kg Zylinder)	4.66E-03
4	Lachenbrand Treibstoffe (28 t)	2.31E-01
5	Explosion Benzindämpfe (28 t)	1.19E-01
6	Chlorfreisetzung (20 t)	2.00E-04
7	BLEVE LPG aus Tank (18 t)	4.60E-03
8	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	4.60E-03
9	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	4.60E-03
10	Ammoniakfreisetzung (18 t)	8.75E-03
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	1.75E-02
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	1.75E-02
13	BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)	7.62E-03

Verzögerung

Eine Einflussgrösse auf das Ausmass ist die zeitliche Verzögerung zwischen dem Initialereignis und dem Szenario nach Abb. 4.78 selbst. Die Verzögerung beeinflusst insbesondere die Zeit, die für die Selbstrettung zur Verfügung steht, d.h. die Zeit, welche die Personen haben nach dem Ereignis, um sich in Sicherheit zu bringen. Generell gibt es weder statistische Grundlagen zur Verzögerungszeit [24], noch zur Nutzung dieser Verzögerungszeit durch die Tunnelbenutzer zur Selbstrettung. In der Regel vergeht einige Zeit, bis die Tunnelbenutzer überhaupt bereit sind, ihre Fahrzeuge zu verlassen und sich in Sicherheit zu bringen.

Die Verzögerung wurde in [24] durch plausible Abschätzungen szenarienspezifisch bestimmt und ist in Abb. 4.80 angegeben.

Abb. 4.80 Verzögerung zwischen Initialereignis und dem Szenario [24].

[#]	Szenario	t [s]
3	BLEVE eines LPG (50 kg Zylinder)	900
4	Lachenbrand Treibstoffe (28 t)	300
5	Explosion Benzindämpfe (28 t)	180
6	Chlorfreisetzung (20 t)	60
7	BLEVE LPG aus Tank (18 t)	900
8	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	180
9	Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t)	900
10	Ammoniakfreisetzung (18 t)	60
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	60
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	60
13	BLEVE CO ₂ verflüssigt (20 t)	900

Toxizität

Der Knoten Toxizität berücksichtigt, wie gross die Toxizität der einzelnen relevanten Szenarien ist. Es wird hier semiquantitativ die Stufen „keine“, „gering“, „mittel“ und „hohe“ Toxizität unterschieden. Diese Einteilung ist semiquantitativ, da im Knoten *Todesfälle* und *Verletzte* die Verknüpfung zu quantitativen Werten erfolgt.

Die Toxizität ist auch abhängig davon, welches Szenario eintritt und welche Menge an toxischen Stoffen austritt. Dieser Zusammenhang basiert auf plausiblen Annahmen und ist in Abb. 4.81 zusammengestellt.

Die Nummerierung der Szenarien kann Abb. 4.78 entnommen werden.

Abb. 4.81 Wahrscheinlichkeit für die Grösse der Toxizität in Abhängigkeit vom Ereignis.

Toxizität	Szenario Nr.			
	6	10	11	12
Keine	0	0	0	0.05
Gering	0	0	0	0.9
Mittlere	0.3	0.6	0.1	0.05
Hohe	0.7	0.4	0.9	0

Explosion

Das Szenario Explosion fasst verschiedene Szenarien, die in Abb. 4.78 separat aufgeführt, sind zusammen. Hierunter fallen die Szenarien BLEVE eines LPG (50 kg Zylinder), Explosion Benzindämpfe (28 t), BLEVE LPG aus Tank (18 t), Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t), Gaswolkenbrand LPG aus Tank (18 t), BLEVE CO₂ verflüssigt (20 t).

Als Gaswolkenbrand wird eine Mischung aus entzündlichen Gasen und Luft bezeichnet, die sich plötzlich explosionsartig entzündet.

Ein BLEVE ist eine Gasexplosion einer expandierenden, siedenden Flüssigkeit und entsteht, wenn der Druck in einem Flüssigkeitsbehälter grösser ist als der Druckwiderstand des Behälters. Der hohe Druck kann durch verschiedene Gründe entstehen, meistens jedoch durch ein Brandereignis ausserhalb des Behälters.

Die Wahrscheinlichkeit für die Grösse einer Explosion wird über das Szenario bestimmt. Da statistische Werte fehlen, werden hier die Wahrscheinlichkeiten für die Grösse einer Explosion plausibel abgeschätzt. Analog zur Toxizität werden auch bei der Explosion semiquantitative Stufen für die Einschätzung der Grösse einer Explosion verwendet. Diese werden in Abb. 4.82 quantifiziert.

Abb. 4.82 Wahrscheinlichkeit für die Grösse der Explosion in Abhängigkeit vom Ereignis.

Explosion	Szenario-Nr.					
	3	5	7	8	9	13
Keine	0	0	0	0	0	0
Klein	0.9	0.05	0	0.05	0.05	0.05
Mittlere	0.1	0.9	0.1	0.9	0.9	0.05
Grosse	0	0.05	0.9	0.05	0.05	0.9

Lachenbrand

Die Ereignisrate für einen Lachenbrand pro Fahrzeugkilometer ist in [24] definiert. Die Grösse des Lachenbrands ist direkt abhängig von der Lachengröszen, d.h. von der Fläche, die mit dem Brennstoff benetzt ist.

Ein wesentlicher Faktor, der diese Fläche beeinflusst, ist das Entwässerungssystem, welches im Tunnel vorhanden ist, sowie dessen Kapazität. Zwei generell unterschiedliche Systeme kommen in Tunneln zum Einsatz: Schlitzrinnen und Einlaufschächte.

Neben dem Entwässerungssystem spielt auch die Längsneigung, die Querneigung, die Fahrbahnbreite, die Anzahl Fahrspuren und die Verkehrsführung eine Rolle. Die gesamte benetzte Fläche wird in zwei prinzipielle Teilflächen unterteilt. Die erste Fläche ist unabhängig vom Entwässerungssystem und berücksichtigt den Fluss der brennbaren Flüssigkeit bis zum Tunnelrand.

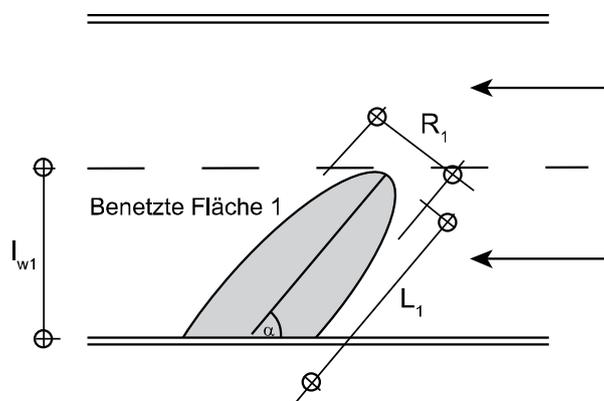


Abb. 4.83 Teil der benetzten Fläche, die die Ereignisgrösze bestimmt.

Die Länge dieser benetzten Fläche L_1 , die in Abb. 4.83 dargestellt ist, wird wie folgt berechnet:

$$L_1 \approx l_{w1} / [\sin(\arctan(c/g))] \quad [m^2] \quad (30)$$

Die Länge L_1 ist abhängig von der Längsneigung g und der Querneigung c im speziellen Segment. Die Breite R_1 der Lache kann der Dokumentation [55] entnommen werden. Die Gleichung entspricht einer Modifikation von Ingasons's Gleichung:

$$R_1 \approx 2.4 \cdot V^{0.46} \quad [m] \quad (31)$$

Gleichung (31) enthält die mit V bezeichnete Ausflussrate in Litern/s, die in [55] zu 20.6 l/s angegeben ist.

Die benetzte Fläche berechnet sich unter Verwendung von Gleichung (30) und (31) damit zu:

$$A_1 \approx L_1 \cdot R_1 \quad [m^2]$$

Der zweite Teil der benetzten Fläche ist abhängig vom Entwässerungssystem. Die Flächen sind prinzipiell für die beiden Entwässerungssysteme in Abb. 4.84 für Schlitzrinnen dargestellt.

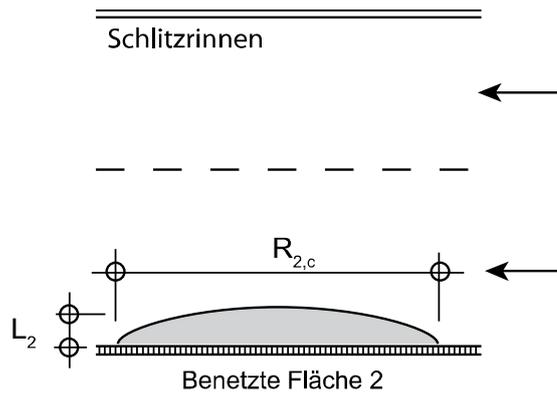


Abb. 4.84 Benetzte Flächen bei Schlitzrinnen.

Bei Schlitzrinnen ist die Fläche an der Einlaufstelle bestimmt durch den Rückstau, der sich bilden kann. Dieser Rückstau ist abhängig von der Ausflussrate am Ereignisort V und der Einlaufrate an der Schlitzrinne und damit direkt abhängig von der Öffnungsgrösse der Schlitzrinne x . Die Ausbreitungslänge am Einlauf kann berechnet werden zu:

$$R_{2,c} = V / (0.5 \cdot x \text{ [cm]}) \quad [m] \tag{32}$$

Der Wert L_2 ist gemäss [55] proportional zu $V^{0.5} / c$ (Querneigung). Die gesamte benetzte Fläche bei Schlitzrinnen kann damit berechnet werden zu:

$$A_c \approx R_{2,c} \cdot (V^{0.5} / c) + A_1 \tag{33}$$

Im Fall von diskreten Einlaufschächten ist der zweite Teil der Fläche in der Regel grösser. Die Situation für diskrete Einlaufschächte ist in Abb. 4.85 dargestellt. Die Ausbreitungslänge der zweiten benetzten Fläche ist direkt abhängig vom Abstand der Einlaufschächte und beträgt im Mittel:

$$R_{2,d} = d/2 \quad [m] \tag{34}$$

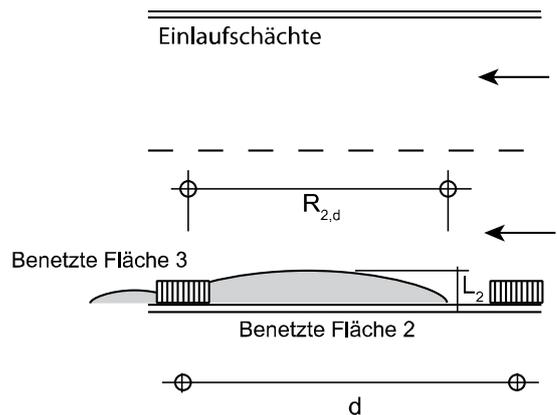


Abb. 4.85 Benetzte Flächen bei Einlaufschächten.

Bei diskreten Einlaufschächten wird davon ausgegangen, dass der Einlaufschacht die Menge an auslaufender Flüssigkeit vollständig aufnehmen kann. Effekte von beispielsweise Rückstau wird pauschal mit 20 m² berücksichtigt. Die Gesamtfläche im Fall von Einlaufschächten kann berechnet werden zu:

$$A_d \approx (d / 2) \cdot (V^{0.5} / c) + 20 + A_l \tag{35}$$

Die Brandleistung Q [MW] ist gegeben durch:

$$Q = m'' \cdot A \cdot H \tag{36}$$

Hierin bezeichnet m'' die Brandereignisrate von Benzin, A ist die Grösse der benetzten Fläche gemäss Gleichung (33) bzw. (35) und H bezeichnet die Verbrennungswärme von Benzin. Es kann angenommen werden, dass:

$$m'' = 0.055 \quad [kg/s \cdot m^2] \tag{37}$$

$$m'' = 48 \quad [MJ/kg] \tag{38}$$

Damit ergibt sich die Brandleistung in Abhängigkeit von der benetzten Fläche zu:

$$Q \approx A \cdot 2.64 \quad [MW] \tag{39}$$

Um die Unsicherheiten in der Brandereignisrate, in den Ausbreitungsflächen und in der Verbrennungswärme zu berücksichtigen, wird die Brandleistung als Lognormale Zufallsvariable modelliert. Der Mittelwert ergibt sich nach Gleichung (21) und der Variationskoeffizient kann zu 1.1 angenommen werden.

4.3.4 Modellierung der Konsequenzen

Die berücksichtigten Konsequenzen infolge von Gefahrgutereignissen sind in Abb. 4.86 zusammengestellt.

Abb. 4.86 Berücksichtigte Konsequenzen bei Gefahrgutereignissen.

Konsequenzen	Toxizität	Verletzte
		Tote
	Explosion	Verletzte
		Tote
	Brände	Verletzte
		Tote

Die Anzahl Todesfälle und Verletzte wird ausserhalb des Bayes'schen Netzes berechnet. Hierfür werden die Ereignisraten aus dem Bayes'schen Netz für die einzelnen Szenarien und deren Intensitäten (also beispielsweise für 50 MW Brand und 100 MW Brand) und die Todesfallwahrscheinlichkeit bzw. die Wahrscheinlichkeit einer Verletzung einer Person, die sich zum Ereigniszeitpunkt im Tunnel aufhält, verwendet.

Unter Berücksichtigung der Zeitvariationskurven des Verkehrs, der Geschwindigkeitsbegrenzung, der mittleren Anzahl Personen im Fahrzeug, Art der Verkehrsführung und der mittleren Anzahl Personen im gefährdeten Bereich wird die Anzahl an Todesfällen und Verletzten berechnet. Die Gefahrgutereignisse finden in einem bestimmten homogenen Segment statt, die Konsequenzen sind aber generell nicht auf das Segment beschränkt. Es wird für toxische Ereignisse und Explosionen angenommen, dass die verschiedenen Ereignisse die Ausbreitungslängen haben, die in Abb. 4.87 angegeben sind. Es handelt sich dabei um maximale Ausbreitungslängen, d.h. sie können nur die volle Länge erreichen, wenn der Tunnel lang genug ist. Für Brände ist Ausbreitungslänge in den Simulationen bereits berücksichtigt.

Abb. 4.87 Berücksichtigte Ausbreitungslängen pro Szenario und Intensität.

Toxische Ereignisse	Gering	Mittel	Hoch
Ausbreitungslänge [m]	100	300	600
Explosion	Klein	Mittel	Gross
Ausbreitungslänge [m]	100	300	600

Verletzte und Todesfälle infolge Toxizität

Die Knoten Todesfälle und Verletzte enthält die Wahrscheinlichkeit, dass eine statische Person, die sich im Einflussbereich des Ereignisses befindet, durch das toxische Ereignis verletzt wird oder stirbt.

Im Model der PIARC [55] wird die Todesfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Konzentration C im Tunnel und der Zeit t nach dem Austritt der Substanz unter Verwendung von Probitfunktionen modelliert.

Die Probitfunktionen für die Todesfallwahrscheinlichkeit können wie folgt angegeben werden:

$$\text{Probit}_{\text{Chlor},\text{Tod}} = - 5 + 0.5 \ln (C^{2.75} \cdot t) \tag{40}$$

$$\text{Probit}_{\text{Ammonium},\text{Tod}} = - 35.95 + 1.85 \ln (C^2 \cdot t) \tag{41}$$

$$\text{Probit}_{\text{Acrolein},\text{Tod}} = - 3.18 + \ln (C \cdot t) \tag{42}$$

Die Probitfunktionen für die Wahrscheinlichkeit von Verletzungen infolge Toxizität können wie folgt angegeben werden.

$$\text{Probit}_{\text{Chlor},\text{Verl}} = - 10.085 + \ln (C^{2.75} \cdot t) \tag{43}$$

$$\text{Probit}_{\text{Ammonium},\text{Verl}} = - 21.43 + \ln (C^{3.33} \cdot t) \tag{44}$$

$$\text{Probit}_{\text{Acrolein},\text{Verl}} = - 2.34 + \ln (C \cdot t) \tag{45}$$

Wird angenommen, dass eine geringe Toxizität zu einer Todesfallwahrscheinlichkeit von 5 %, eine mittlere Toxizität zu einer Todesfallwahrscheinlichkeit von 35 % und eine hohe Toxizität zu einer Todesfallwahrscheinlichkeit von 80 % führt, so können die Probitwerte dieser Szenarien berechnet werden zu:

$$\text{Probit} = \Phi^{-1} (\text{Pr}_{\text{Tod}}) + 5 \tag{46}$$

In Gleichung (46) bezeichnet Φ^{-1} die Inverse der Standardnormalverteilung. Unter der Annahme, dass die Probitfunktionen, die in [55] angegeben sind, für die verschiedenen Szenarien kalibriert sind, können damit die Basiskonzentrationen der Ereignisse berechnet werden. Es wurde eine mittlere Zeit nach dem Ereignis von 60 s angenommen. Die Basiskonzentrationen sind in Abb. 4.88 zusammengestellt.

Abb. 4.88 Basiskonzentrationen der verschiedenen Szenarien und Intensitäten.

Szenario		Basiskonzentrationen [ppm]		
		Gering	Mittel	Hoch
6	Chlorfreisetzung (20 t)	338	846	2065
10	Ammoniakfreisetzung (18 t)	29040	40817	56866
11	Acroleinfreisetzung aus Tank (25 t)	344	1214	4140
12	Acroleinfreisetzung aus Zylinder (100 l)	344	1214	4140

Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die verschiedenen Intensitäten in Abhängigkeit der Szenarien auftreten sind in Abb. 4.81 gegeben.

Die Basiskonzentrationen beziehen sich auf den Fall, dass im Tunnel nur eine natürliche Lüftung vorhanden ist. Lüftungssystem können die Basiskonzentrationen verringern. Reduktionsfaktoren für die Basiskonzentrationen sind in Abb. 4.89 zusammengestellt.

Abb. 4.89 Reduktionsfaktoren der Basiskonzentration durch Lüftung.

Ereignisdetktion	Ja	Nein
Natürliche Lüftung	1.00	1.00
Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	0.80	1.00
Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	0.70	1.00
Absaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	0.60	1.00
Absaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit	0.50	1.00

Verletzte und Todesfälle infolge Explosionen

Die Todesfallwahrscheinlichkeit nach einer Explosion wurde abgeschätzt in Abhängigkeit von der Zündverzögerung zwischen dem Initialereignis und der Explosion, sowie unter Berücksichtigung der Intensität des Ereignisses. Die Zündverzögerung kann unter Umständen helfen, die gefährdete Stelle zu verlassen und sich in Sicherheit zu bringen. In Abb. 4.90 ist die Todesfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Zündverzögerung zusammengestellt.

Abb. 4.90 Wahrscheinlichkeit für die Schädigung einer Person durch Explosionen in Abhängigkeit der Zündverzögerung.

Explosion	0 s			60 s			90 s		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L
Unverletzt	0.80	0.50	0.10	0.81	0.52	0.12	0.81	0.53	0.14
Verletzt	0.15	0.30	0.10	0.14	0.29	0.11	0.14	0.28	0.11
Tod	0.05	0.20	0.80	0.05	0.19	0.77	0.05	0.19	0.75
Explosion	120 s			180 s			300 s		
	S	M	L	S	M	L	S	M	L
Unverletzt	0.82	0.54	0.16	0.83	0.55	0.18	0.68	0.59	0.24
Verletzt	0.14	0.28	0.11	0.13	0.27	0.12	0.12	0.25	0.13
Tod	0.04	0.18	0.73	0.04	0.18	0.70	0.2	0.16	0.63
Explosion	600 s			900 s					
	S	M	L	S	M	L			
Unverletzt	0.90	0.68	0.36	0.94	0.77	0.50			
Verletzt	0.08	0.20	0.17	0.05	0.15	0.20			
Tod	0.02	0.12	0.47	0.01	0.08	0.3			

Verletzte und Todesfälle infolge von Lachenbränden

Die Anzahl Verletzte und Todesfälle werden analog zu den Bränden infolge normaler Verkehrereignisse berechnet.

4.4 Aggregation der Risiken

Mit der Aggregation von Risiken wird es möglich, einen Gesamtüberblick über die Risiken eines Systems herzustellen, um diese gesamthaft behandeln zu können. Die Risiken sind die:

- erwartete Anzahl Todesfälle (Brände, Unfälle),
- erwartete Anzahl Verletzte (Brände Unfälle),
- erwartete Anzahl Brände sowie die
- erwartete Anzahl Gefahrgutunfälle

Bei der hier dokumentierten Methode können die Risiken über das gesamte Tunnelsystem aufsummiert werden, solange die einzelnen Risiken die gleiche Einheit besitzen.

Die Beiträge werden in dieser Methodik nicht monetarisiert. Das bedeutet, die Risiken bleiben in ihrer natürlichen Einheit und lassen sich dadurch nicht gesamthaft darstellen. Es wird mit dieser Methodik kein einzelner Risikowert für den Tunnel ermittelt, der das Gesamtrisiko darstellt. Um dies zu tun, müssten die Sach- und Personenschäden infolge Bränden und Gefahrgutunfällen sowie die Sach- und Personenschäden infolge von Unfällen in Geldeinheiten transferiert werden. Aggregiert werden die Risiken über das gesamte Tunnelsystem gemäss der Systemdefinition.

5 Risikobewertung

5.1 Einleitung

Die Resultate der Risikobeurteilung und der Bewertung der Akzeptanz von Risiken stellen einen wesentlichen Pfeiler für die Entscheidungsfindung dar und ermöglichen es, Entscheidungen in Bezug auf risikoreduzierende Massnahmen zu begründen und zu dokumentieren. Durch die Systemabgrenzung werden jedoch von der vorliegenden Methodik nicht alle Aspekte berücksichtigt. Aspekte, wie beispielsweise der Ablauf der Unterhaltsplanung auf den Nationalstrassen und der optimale Zeitpunkt der Umsetzung der Massnahmen sind nicht in der Analyse berücksichtigt.

In die Entscheidungsfindung gehen die Personenrisiken, die sich aus Unfällen, Bränden und Gefahrgutereignissen ermittelt worden sind, ein.

5.2 Risikoreduzierende Massnahmen und Massnahmenkombinationen

Der Identifikation der Massnahmen und der Massnahmenbeurteilung kommt ein besonders hoher Stellenwert zu, da das Risiko im ALARP Bereich (siehe Kapitel 5.6.1 und Abb. 5.7) nur als tolerierbar eingestuft werden kann, wenn gezeigt wird, dass keine Massnahme effizient ist.

Die Resultate der Risikobewertung und der Massnahmenplanung sind Handlungsempfehlungen, die die folgenden Aspekte generell nicht berücksichtigen:

- ökologische Kriterien;
- gesellschaftliche Präferenzen und gesetzliche Vorgaben in Bezug auf den Individualverkehr;
- Unterhaltsplanung auf den Nationalstrassen;
- allgemeine Verfügbarkeit von Ressourcen;
- Einflüsse von Massnahmen auf andere Teile des Nationalstrassennetzes.

Wenn solche Aspekte von Bedeutung sind, wird empfohlen, das Risiko und die Kosten der Massnahme separat, wenn möglich quantitativ, einzuschätzen und die Entscheidungsfindung in ähnlicher Weise, wie im vorliegenden Risikokzept, durchzuführen. Die Grundlagen für die Bewertung sind im Risikobericht zu dokumentieren.

5.3 Massnahmennutzenrechnung M_{NU}

In der Risikoermittlung wird auf die Personensicherheit fokussiert, d.h. der Nutzen, der aus den ausgeführten Massnahmen resultiert. Dieser ist definiert als die Differenz aus dem Erwartungswert der Anzahl Todesfälle und Verletzte pro Jahr vor Umsetzung von Massnahmen und dem Erwartungswert der Anzahl Todesfälle und Verletzte pro Jahr nach Umsetzung von Massnahmen. Um nur eine Nutzenkomponente zu erhalten, werden die verhinderten Todesfälle und Verletzten in eine gemeinsame Nutzenkomponente überführt, die verhinderten Todesfalläquivalenten entspricht.

Sachschäden, bzw. der Nutzen aus der Vermeidung der Schäden, werden nicht mit in die Entscheidungsfindung einbezogen. Die Sachschäden sind in der Regel durch die Haftpflichtversicherungen der Fahrzeugführer gedeckt. Diese Deckung beinhaltet das gesamte Portfolio und mögliche Schäden des Einzelnen.

Das sehr seltene Risiko für den einzelnen Fahrer, einen Sachschaden an der Infrastruktur zu verursachen, dominiert nicht die Versicherungsprämie des Einzelnen. Der Einfluss der Sicherheitsmassnahmen hat daher nur einen marginalen Einfluss und ist gesamtwirtschaftlich für die Entscheidungsfindung nicht relevant und wird hier nicht berücksichtigt.

Der Nutzen aus verhinderten Sperrungen von Tunneln infolge von Ereignissen und dadurch verminderte Kosten infolge einer Umfahrung (Zeitkosten, Betriebskosten, erhöhte Gefährdungen, etc.) sind nicht Bestandteil dieser Dokumentation. Diese können jedoch bei einer speziellen Problemstellung gemäss [39] berücksichtigt werden.

5.3.1 Vermeidung von Todesfällen

Die Vermeidung von Todesfällen ist ein Nutzen, den die Umsetzung einer Massnahme zufolge hat. Dieser Nutzen wird berechnet, indem der Mittelwert der Anzahl Todesfälle pro Jahr vor der Durchführung einer Massnahme $F_{a,Fat}$ berechnet wird und der Mittelwert der Anzahl Todesfälle pro Jahr nach Durchführung einer Massnahme $F_{a,Mi,Fat}$ berechnet wird. Die Differenz zwischen beiden Werten ergibt sich durch:

$$\Delta F_{a,Mi,Fat} = F_{a,Fat} - F_{a,Mi,Fat} \quad (47)$$

Mit $\Delta F_{a,Mi,Fat}$ ist die jährliche Reduktion des Mittelwertes der Anzahl Todesfälle durch die Massnahme M_i bezeichnet.

Die Berechnung des Erwartungswertes der Anzahl Todesfälle für verschiedene Massnahmen ist in Kapitel 4 beschrieben.

5.3.2 Vermeidung von Verletzten

Auch die Vermeidung von Verletzten stellt einen Nutzen dar, der in der Analyse berücksichtigt werden muss. Dieser Nutzen wird berechnet, indem der Mittelwert der Anzahl Verletzte pro Jahr vor der Durchführung einer Massnahme $F_{a,Cas}$ berechnet wird und der Mittelwert der Anzahl Verletzten pro Jahr nach Durchführung einer Massnahme $F_{a,Mi,Cas}$ berechnet und die Differenz zwischen beiden Werten gebildet wird:

$$\Delta F_{a,Mi,Cas} = F_{a,Cas} - F_{a,Mi,Cas} \quad (48)$$

Mit $\Delta F_{a,Mi,Cas}$ ist die jährliche Reduktion des Mittelwertes der Anzahl Verletzte durch die Massnahme M_i bezeichnet.

Eine Differenzierung nach Verletzungsgraden wird nicht vorgenommen. Die Berechnung des Erwartungswertes der Anzahl Verletzte für verschiedene Massnahmen ist in Kapitel 4 beschrieben.

5.3.3 Massnahmengesamtnutzen

Der Gesamtnutzen setzt sich zusammen aus den durch eine oder mehrere Massnahmen verhinderten Todesfällen und Verletzten. Um nur eine Einheit verwenden zu können und die Akzeptierbarkeit daraufhin zu bewerten, muss eine konstruierte Einheit entwickelt werden, die Todesfälle und Verletzte gleichermassen berücksichtigen kann.

Natürlich kann ein solcher Transfer in eine Einheit immer diskutiert werden. Die Art wie Verletzung und auch die Schwere von Verletzungen wahrgenommen wird, ist sowohl vom Typ des Ereignisses, wie beispielsweise Brände oder Verkehrsunfälle, sehr unterschiedlich und ein Vergleich mit Todesfällen nicht einfach.

Dies macht es schwierig, einen geeigneten Ansatz zu finden. Dennoch ist der Nutzen durch verhinderte Verletzte vorhanden und eine Nichtberücksichtigung, kann zu inkonsistenten Entscheidungen führen.

Hier soll der generellen Philosophie der *quality adjusted life years* gefolgt werden [75], d.h. es soll versucht werden, die Verletzungen je nach Schweregrad in äquivalente Todesfälle umzurechnen.

Dabei bleiben die Anzahl Todesfälle in ihrer Einheit bestehen und die Verletzten werden als Approximation in Todesfalläquivalente umgerechnet. Die Umrechnung in Todesfalläquivalente erfolgt über die Unfallfolgekosten. Die Anzahl Verletzte kann in Unfallschwereregruppen eingeteilt werden.

Die Unfallstatistik in der Schweiz unterscheidet Leicht- und Schwerverletzte. Die Auswertung der Unfalldaten im Gubristtunnel von 1986 bis 2011 hat gezeigt, dass der Anteil Leichtverletzte 78 % aller Verletzten beträgt. Der Anteil Schwerverletzte beträgt 22 % aller Verletzten. Dieses Verhältnis findet sich auch, wenn alle Strassen und Unfallursachen schweizweit betrachtet werden, wie aus [76] zu entnehmen ist.

Die Unfallfolgekosten in der Schweiz sind in [77] angegeben und in Abb. 5.1 zusammenfassend dargestellt.

Abb. 5.1 Unfallfolgekosten für Schwerverletzte, Leichtverletzte und Todesfälle nach [77].

	Leichtverletzte	Schwerverletzte	Todesfälle
Unfallfolgekosten [CHF]	33'373	466'003	3'177'234
	102'521.37		

Das Verhältnis zwischen Unfallfolgekosten für Verletzten und Todesfälle beträgt ungefähr 31. Damit entsprechen ca. 31 Verletzte einem Todesfall. Der Gesamtnutzen infolge von Massnahmen ergibt sich dadurch zu:

$$M_{Nu} = \Delta F_{a,Mi,Fat} + (\Delta F_{a,Mi,Cas} / 31) \tag{49}$$

Hierin bezeichnet $\Delta F_{a,Mi,Fat}$ die Anzahl verhinderter Todesfälle pro Jahr durch die Massnahme M_i und $\Delta F_{a,Mi,Cas}$ bezeichnet die Anzahl verhinderter Verletzte durch die Massnahme M_i .

Der Massnahmennutzen hat die Einheit „verhinderte Todesfälle pro Jahr“.

5.4 Massnahmenkostenrechnung M_{K_0}

Die Effizienz von Massnahmen wird bewertet durch das Verhältnis von Massnahmenkosten zum Massnahmennutzen.

Die Kosten der Massnahme M_{K_0} werden als jährliche Kosten über die Lebensdauer der Massnahme berechnet. Die Kosten umfassen alle auftretenden Kosten, d.h. die Planungskosten, die Anschaffungskosten, die Bau- beziehungsweise Installationskosten, sowie Kosten für den Unterhalt und für die Wartung der Massnahme.

Die jährlichen Kosten der Massnahme werden wie folgt berechnet.

Im ersten Schritt werden alle Kosten unter Verwendung der Barwertmethode auf den Entscheidungszeitpunkt bezogen. Dies impliziert, dass der Kapitalwert bzw. der Barwert C_y zum Zeitpunkt $t = 0$ berechnet. Dieser berechnet sich nach Gleichung (50) zu:

$$M_{K_o,t=0} = M_{Inv} + M_U \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1 + \gamma)^j} = M_{Inv} + M_U \cdot \frac{(\gamma + 1)^n - 1}{\gamma(\gamma + 1)^n} \quad (50)$$

Hierin bezeichnet M_{Inv} die Investitionskosten der Massnahme M , die zum Zeitpunkt $t = 0$ anfallen. Mit M_U werden die Unterhaltskosten pro Jahr bezeichnet. Diese fallen zu späteren Zeitpunkten an und werden mit der Barwertmethode auf den jetzigen Zeitpunkt $t = 0$ bezogen. Mit n in Gleichung (50) ist die Zeit (Jahre) bezeichnet und berücksichtigt die Lebensdauer der Massnahme. Mit γ ist der Zinssatz bezeichnet.

Um die Massnahmenkosten mit der jährlichen Risikoreduktion vergleichen zu können, müssen die Massnahmenkosten pro Jahr M_{K_o} ermittelt werden. Hierfür wird im zweiten Schritt die Annuitätenrechnung verwendet. Wird die Teuerung der Unterhaltskosten in der Zukunft berücksichtigt, und ist die Teuerungsrate λ , ergeben sich die jährlichen Kosten einer spezifischen Massnahme M_{K_o} zu:

$$M_{K_o} = M_{Inv} \frac{\gamma(\gamma + 1)^n}{(\gamma + 1)^n - 1} + M_U \frac{\gamma((\gamma + 1)^n - (\lambda + 1)^n)}{((\gamma + 1)^n - 1)(\gamma - \lambda)} \quad \forall \gamma, \lambda, n \geq 0 \quad (51)$$

Man erhält zwei unterschiedliche Faktoren, der erste ist der Annuitätenfaktor:

$$A = \frac{\gamma(\gamma + 1)^n}{(\gamma + 1)^n - 1} \quad (52)$$

Der zweite Faktor ist der Teuerungsfaktor der Unterhalts- und Sanierungskosten:

$$T = \frac{\gamma((\gamma + 1)^n - (\lambda + 1)^n)}{((\gamma + 1)^n - 1)(\gamma - \lambda)} \quad (53)$$

Ist $\lambda = \gamma$, so gilt für den Teuerungsfaktor

$$T = \frac{n}{(1 + \lambda)} \frac{\lambda}{1 - \frac{1}{(1 + \lambda)^n}} \quad (54)$$

Damit ergibt sich Gleichung (51):

$$M_{K_o} = M_{Inv} \cdot A + M_U \cdot T \quad \forall \gamma, \lambda, n \geq 0 \quad (55)$$

In Abb. 5.2 bis Abb. 5.4 sind Annuitätenfaktoren und Teuerungsfaktoren für unterschiedliche Zinssätze und Teuerungsraten aufgeführt.

Abb. 5.2 Teuerungsfaktor und Annuitätenfaktor für $\gamma = 2\%$ und $\lambda = 1\%$.

	n=10	n=15	n=20	n=25	n=30	n=35	n=40	n=50	n=80
T	1.045	1.069	1.094	1.118	1.143	1.167	1.191	1.238	1.372
A	0.111	0.078	0.061	0.051	0.045	0.04	0.037	0.032	0.025

Abb. 5.3 Teuerungsfaktor und Annuitätenfaktor für $\gamma = 2\%$ und $\lambda = 2\%$.

	n=10	n=15	n=20	n=25	n=30	n=35	n=40	n=50	n=80
T	1.091	1.144	1.199	1.255	1.313	1.373	1.434	1.560	1.973
A	0.111	0.078	0.061	0.051	0.045	0.04	0.037	0.032	0.025

Abb. 5.4 Teuerungsfaktor und Annuitätenfaktor für $\gamma = 2\%$ und $\lambda = 3\%$.

	n=10	n=15	n=20	n=25	n=30	n=35	n=40	n=50	n=80
T	1.141	1.226	1.318	1.415	1.518	1.628	1.745	2.001	2.975
A	0.111	0.078	0.061	0.051	0.045	0.04	0.037	0.032	0.025

5.4.1 Investitionskosten M_{inv} , Unterhaltskosten M_U und Lebensdauern n

Die Investitionskosten der Massnahmen sind projektspezifisch zu ermitteln oder abzuschätzen. In einer frühen Projektphase kann eine erste Schätzung verwendet werden, die dann in den weiteren Projektphasen spezifiziert werden kann. Es gelten die Vorgaben gemäss [21].

Die Kosten für den jährlichen Unterhalt M_U als Prozentsatz der Investitionskosten M_{inv} können [10] entnommen werden. Für nicht aufgelistete Massnahmen sind die Unterhaltskosten projektspezifisch zu ermitteln.

Die Lebensdauern der Massnahmen n sind der Norm SIA 197/2 Anhang A [16] zu entnehmen. Es ist der untere Wert für die Nutzungsdauer einzusetzen.

Die Kosten für eine Reduktion der Geschwindigkeit sind gesellschaftliche Kosten, die auch in die Kostenrechnung als Unterhaltskosten eingehen müssen. Die Reisezeitveränderung, die sich durch die Veränderung der signalisierten Geschwindigkeit im Tunnel ergibt, kann approximiert werden durch:

$$\Delta TR = \sum_{i=1}^m \frac{l_{HS,i} [km]}{v1_{HS,i} [km / h]} - \sum_{i=1}^m \frac{l_{HS,i} [km]}{v2_{HS,i} [km / h]} \tag{56}$$

Hierin bezeichnet $l_{HS,i} [km]$ die Länge eines homogenen Segmentes i , $v1_{HS,i}$ die signalisierte Geschwindigkeit im Ausgangszustand und $v2_{HS,i}$ die signalisierte Geschwindigkeit nach Durchführung der Massnahme. Wechselt die signalisierte Geschwindigkeit innerhalb des Tunnels nicht, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\Delta TR = l [km] \cdot \left(\frac{1}{v_2 [km / h]} - \frac{1}{v_1 [km / h]} \right) \tag{57}$$

Hierin bezeichnet l die Länge des Tunnels, $v1$ die signalisierte Geschwindigkeit vor Durchführung der Massnahme und $v2$ die Geschwindigkeit nach Durchführung der Massnahme. Ist $v2$ kleiner als $v1$, so ist ΔTR positiv, was bedeutet, dass die Reisezeit verlängert wird.

Die Anzahl Stunden pro Jahr, die sich durch die Änderung der signalisierten Geschwindigkeit in einem Tunnel ergeben, berechnen sich zu:

$$H = \Delta TR \cdot [Fzg / d] \cdot [365d / a] \tag{58}$$

Die jährlichen Unterhaltskosten für die Massnahme können unter Berücksichtigung der

Zeitkosten berechnet werden. Die Zeitkosten pro Stunde werden analog zu [27] als mittlerer Zeitanatz mit 21 CHF/h angenommen. Damit ergeben sich die jährlichen Unterhaltskosten für die Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit zu:

$$M_U = H \cdot 21 \text{ [CHF / h]} \tag{59}$$

Bei einer Erhöhung der signalisierten Geschwindigkeit ergibt sich ein Nutzen, und Gleichung (57) und damit auch Gleichung (59) liefern negative Werte.

5.4.2 Zinssätze

Im öffentlichen Sektor sollte die Zinsrate so nah wie möglich an der realen ökonomischen Wachstumsrate (pro Kopf) liegen, da der Staat keine unternehmerische Rendite anstrebt.

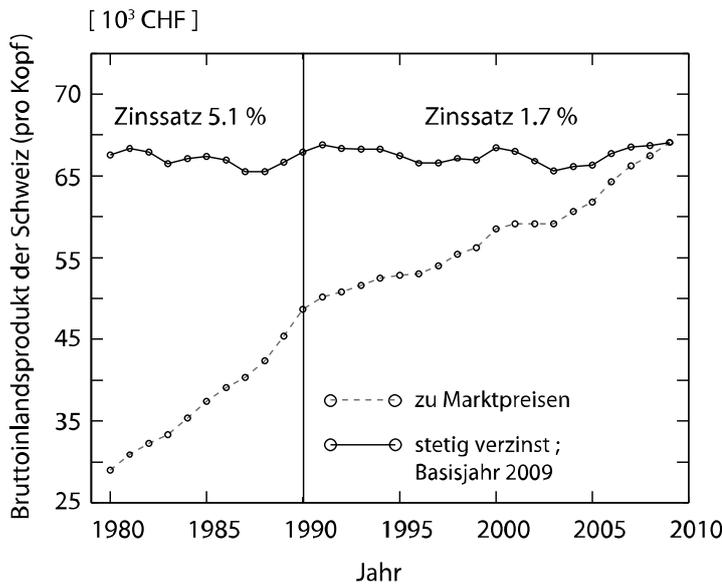


Abb. 5.5 Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts der Schweiz.

Unterstellt man, dass das Bruttoinlandsprodukt ein Indikator für die ökonomische Wachstumsrate ist, dann kann aus Abb. 5.5 gesehen werden, dass das Wirtschaftswachstum in den letzten 20 Jahren bei ungefähr 2 % lag. Langfristig wird damit gerechnet, dass das Wirtschaftswachstum mit diesem Wert hinreichend genau abgeschätzt werden kann [78].

5.4.3 Teuerungsindex

In Abb. 5.6 ist die Entwicklung der durchschnittlichen Teuerung in der Schweiz gegeben.

Es ist erkennbar, dass ab Mitte der 90'er Jahre die Teuerung deutlich abgenommen hat. Der Teuerungsindex liegt im Mittel bei ca. 1 % in den letzten 15 Jahren.

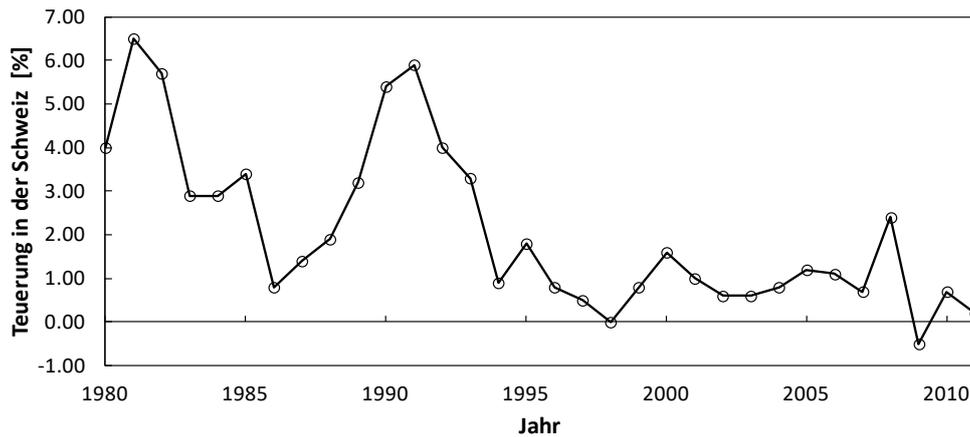


Abb. 5.6 Durchschnittliche Jahresteuering in der Schweiz (Quelle: BfS).

Es kann damit gerechnet werden, dass sich analog zum Wirtschaftswachstum auch die Teuerung bei ca. 1 % einpendeln wird. In der Kostenrechnung sollte daher eine Teuerung von 1 % berücksichtigt werden.

5.5 Massnahmeneffizienz M_{Eff}

Die Massnahmeneffizienz $M_{Eff,i}$ berechnet sich aus dem Verhältnis vom jährlichen Massnahmennutzen M_{Nu} (Kapitel 5.3.3) zu den jährlichen Massnahmenkosten M_{Ko} (Kapitel 5.4)

$$M_{Eff,i} = M_{Nu,i} / M_{Ko,i} \quad (60)$$

Die Massnahmeneffizienz stellt damit die durchschnittlichen Kosten pro verhinderten Todesfall durch die Massnahme dar. Eine Grenze, wann eine Massnahme effizient und akzeptable ist, wird im Kapitel 5.6 definiert. Je kleiner der Wert von M_{Eff} ist, desto weniger wird pro verhinderten Todesfall ausgegeben und desto effizienter ist die Massnahme. Hier werden diskrete Massnahmen betrachtet und die Effizienz entspricht einem Durchschnittswert pro verhinderten Todesfall.

5.6 Risikoakzeptanzkriterien

5.6.1 ALARP Prinzip

Die generelle Philosophie, die verfolgt wird, ist das ALARP Prinzip (As Low As Reasonably Practicable). Das ALARP Prinzip geht auf den Health and Safety at Work etc. Act 1974 der Britischen Regierung zurück [79]. Angewendet wurde das ALARP Prinzip in seiner ursprünglichen Form hauptsächlich in Grossbritannien. Es ist eine Kombination eines fixen Grenzwertes für die Risikoakzeptanz und dem Prinzip der Massnahmeneffizienz, die im Folgenden beschrieben wird.

Das ALARP Prinzip ist in Abb. 5.7 dargestellt. Auf der Y-Achse ist das Risiko (hier als Todesfallrate) aufgetragen. Auf der Y-Achse werden zwei prinzipielle Grenzwerte festgelegt.

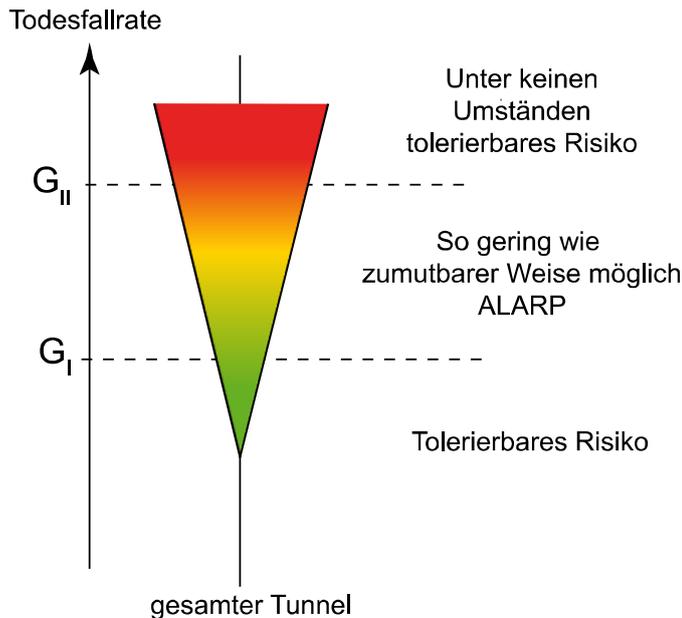


Abb. 5.7 Schematische Darstellung des ALARP Prinzips.

Der obere Grenzwert (G_{II}) stellt das absolute maximale tolerierbare Risiko dar.

Oberhalb dieses Niveaus ist das Risiko nicht akzeptierbar und alle Massnahmen sind gerechtfertigt, um das Risiko so zu reduzieren, dass es unterhalb dieser Grenze liegt. Findet man keine Massnahme, so sind genauere Untersuchungen vor Ort anzustellen und den Tunnel ggf. zu schliessen. Gibt es Massnahmen, die das Risiko unterhalb der Grenze G_{II} bringen, so sollten diese bestenfalls effizient sein, das Kriterium der Massnahmeneffizienz ist in diesem Bereich jedoch nicht massgebend. Dennoch ist auch in diesem Bereich des Risikos zu prüfen, welche Massnahmen und Massnahmenpakete effizient sind, bzw. relativ betrachtet das Risiko am effizientesten reduzieren.

Liegt das Risiko im Tunnel unterhalb des oberen Grenzwertes G_{II} und oberhalb des unteren Grenzwertes G_I , so ist zu prüfen, ob es Massnahmen und Massnahmenpakete gibt, die das Risiko effizient auf ein tolerierbares Niveau verringern. Das Risiko nach Umsetzung aller effizienten Massnahmen wird als tolerierbares Risiko eingestuft und bedarf keiner weiteren Betrachtung, solange sich das Risiko nicht ändert oder sich der Massnahmenkatalog durch technische Weiterentwicklungen nicht ändert.

Der untere Grenzwert G_I definiert den Bereich, der als allgemein tolerierbares Risiko eingestuft werden kann. In diesem Bereich ist eine weitere Untersuchung möglicher risikoreduzierender Massnahmen nicht unbedingt notwendig, kann jedoch durchgeführt werden.

Oberer und unterer Grenzwert des ALARP Prinzips

Im Ablaufdiagramm zur Durchführung einer Risikobeurteilung in Kapitel 2.9 gibt es zwei Grenzwerte, die sich am ALARP Prinzip orientieren, einen unteren Grenzwert (G_I) und einen oberen Grenzwert (G_{II}).

Beide Grenzwerte entsprechen einer Todesfallrate pro Millionen Fahrzeugkilometer im Tunnel. Die obere Grenze stellt einen absoluten Grenzwert dar, der nicht überschritten werden sollte. Ist dieser überschritten, so sind so lange risikoreduzierende Massnahmen durchzuführen, bis das Risiko unterhalb der oberen Grenze liegt. Danach wird die Akzeptierbarkeit des Risikos gemäss Grenzkostenprinzip bestimmt. Dies ist in Kapitel 5.6.3 beschrieben.

Die Grenzwerte des ALARP beziehen sich auf die Todesfallrate im Tunnel pro Millionen Fahrzeugkilometer. Die Grenzkostenbetrachtung hingegen bezieht sich auf die Reduktion der erwarteten Anzahl Todesfälle pro Jahr. Diese entspricht der Todesfallrate multipliziert mit der Exposition, d.h. multipliziert mit der Anzahl Fahrzeugkilometer.

Dies bedeutet, dass im Allgemeinen eine Massnahme zur Risikoreduktion in Tunneln mit viel Verkehr (d.h. mit hoher Exposition) eher effizient ist, als in Tunneln mit geringem Verkehrsaufkommen.

Es wird erreicht, dass einerseits sehr hohe Todesfallraten (unabhängig von der Verkehrsmenge und Länge) vermieden werden, andererseits aber die Mittel dort effizient eingesetzt werden, wo die Exposition hoch ist.

In der ursprünglichen Fassung des ALARP Prinzips liegt der obere Grenzwert des ALARP Prinzips bei 10^{-4} Todesfällen pro Jahr [79]. Der untere Grenzwert liegt um den Faktor 100 geringer bei 10^{-6} Todesfällen pro Jahr.

Diese allgemein anerkannten Grenzwerte können auf schweizerische Tunnel übertragen werden.

In Abb. 5.8 ist die Entwicklung der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Einwohner und Jahr auf Autobahnen in der Schweiz dargestellt. Anfang der 1990'er Jahre lag die Todesfallwahrscheinlichkeit auf den Autobahnen noch über 10^{-5} pro Jahr. Anfang der 2000'er Jahre konnte diese auf unter 10^{-5} pro Jahr gesenkt werden.

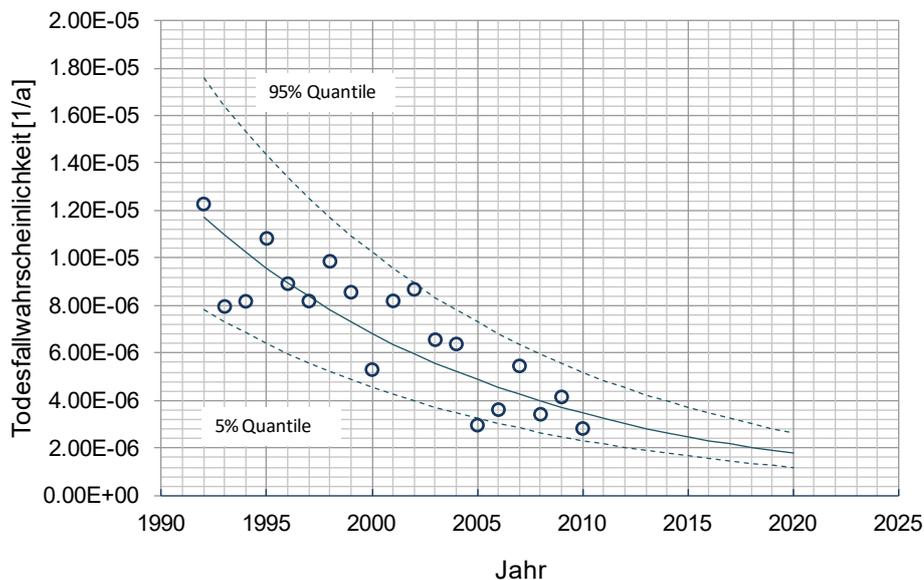


Abb. 5.8 Entwicklung der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Einwohner und Jahr auf den Autobahnen.

Die Abnahme der Todesfallwahrscheinlichkeit auf den Autobahnen zeigt einen exponentiellen Trend, wie aus Abb. 5.8 zu erkennen ist. Dieser Trend ist allgemein auf allen Strassen in Europa zu erkennen. Die Basisdaten zur Berechnung der jährlichen Todesfallwahrscheinlichkeit auf Autobahnen sind in Abb. 5.11 für die Jahre 1992 bis 2010 gegeben.

Analog zur Entwicklung der Todesfallwahrscheinlichkeit hat sich auch die Todesfallrate auf Autobahnen in der Schweiz entwickelt. Diese ist in Abb. 5.9 dargestellt.

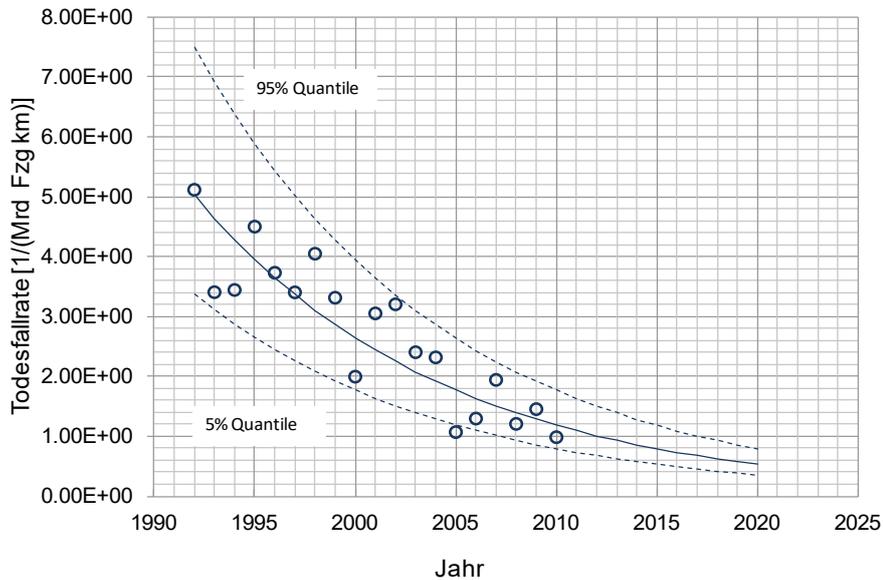


Abb. 5.9 Entwicklung der Todesfallrate auf den Autobahnen in der Schweiz.

Betrachtet man die Todesfallraten in Tunneln der Nationalstrassen (vgl. Abb. 4.9, S.51), so ist erkennbar, dass der Trend ähnlich ist. In Abb. 5.10 ist die Entwicklung der Todesfallrate von 1992 bis 2010 in Tunneln der Nationalstrasse sowie die Entwicklung der Todesfallrate auf den Autobahnen dargestellt. Anfang der 1990'er Jahre liegt der Mittelwert der Todesfallrate oberhalb der Todesfallrate auf den Autobahnen. Ab dem Jahr 2000 liegt der Mittelwert jedoch unterhalb des Mittels der Todesfallrate auf Autobahnen. Es ist jedoch auch erkennbar, dass die Streuung der Todesfallrate generell grösser ist. Dies ist zum einem durch Grossereignisse zu erklären, zum anderen mit einer kleineren Grundgesamtheit.

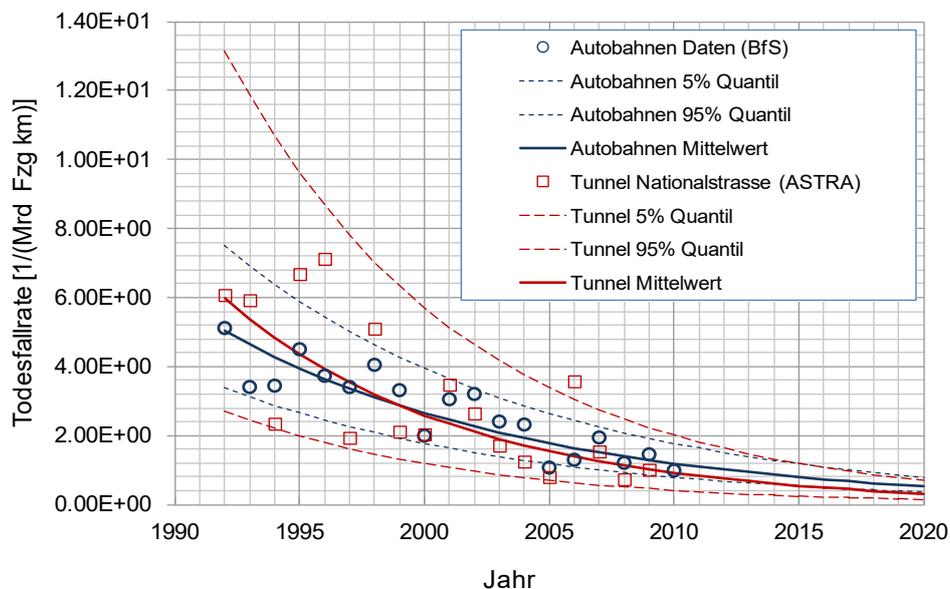


Abb. 5.10 Entwicklung der Todesfallrate von 1992 bis 2010 in Tunneln der Nationalstrasse sowie die Entwicklung der Todesfallrate auf den Autobahnen.

Mit den Daten, die in Abb. 5.11 gegeben sind, lassen sich die ALARP Grenzen berechnen.

Für den oberen Grenzwert ist der Ausgangspunkt eine obere Grenze der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Einwohner und Jahr im Strassenverkehr von 10^{-4} , wie zuvor bereits beschrieben. Damit kann die obere Grenze für die Anzahl an Todesfällen im Strassenverkehr in der Schweiz berechnet werden (siehe Abb. 5.11 Zeile: Todesfälle pro Jahr absolut GII). Dieser Wert kann mit der Verkehrsleistung umgerechnet werden auf die obere Grenze der Todesfallrate pro Mrd. Fahrzeugkilometer (siehe Abb. 5.11 Zeile: Todesfallrate pro Mrd. Fzg. km. GII).

Die weiss hinterlegten Zellen der Tabelle in Abb. 5.11 zeigen die Daten, die in der jeweiligen Datenreihe verfügbar sind. Die grau hinterlegten Zellen sind extrapoliert bzw. interpoliert. Die Quellen der Daten sind direkt in der Abb. 5.11 angegeben.

Jahr	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Todesfälle Total (Nur Autobahn) (Quelle: BFS)	84	55	57	76	63	58	70	61	38	59	63	48	47	22	27	41	26	32	22
	4.5E+10	4.4E+10	4.5E+10	4.6E+10	4.6E+10	4.7E+10	4.8E+10	4.9E+10	5E+10	5.1E+10	5.1E+10	5.2E+10	5.2E+10	5.3E+10	5.3E+10	5.4E+10	5.4E+10	5.5E+10	5.6E+10
Mio. Fzg km (Quelle: BFS)	45152	44159	45025	45677	45927	46606	47542	48740	50159	50651	51252	51773	52306	52773	53191	53627	54428	55362	55883
Mrd. FZ km/Jahr (alle Strassen)	45.15	44.16	45.03	45.68	45.93	46.61	47.54	48.74	50.16	50.65	51.25	51.77	52.31	52.77	53.19	53.63	54.43	55.36	55.89
Anteil Autobahnkilometer	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.40	0.40	0.40
Mrd. FZ km/Jahr (nur Autobahn) (BfU)	16.42	16.15	16.56	16.89	16.89	17.04	17.29	18.41	19.05	19.33	19.67	19.97	20.28	20.57	20.84	21.12	21.54	22.02	22.34
Tote / (Mrd. Fzg. Km) alle Strassen	16.03	13.63	12.47	12.71	10.94	10.32	10.36	9.98	10.04	9.06	8.31	8.78	8.06	6.39	5.73	-	-	5.70	-
Tote / (Mrd. Fzg. Km) Autobahn	5.12	3.41	3.44	4.50	3.73	3.40	4.05	3.31	2.00	3.05	3.20	2.40	2.32	1.07	1.30	1.94	1.21	1.45	0.98
Einwohner CH (Quelle: BFS)	6.8E+06	6.9E+06	7.0E+06	7.0E+06	7.1E+06	7.1E+06	7.1E+06	7.1E+06	7.2E+06	7.2E+06	7.3E+06	7.3E+06	7.4E+06	7.4E+06	7.5E+06	7.5E+06	7.6E+06	7.7E+06	7.8E+06
Todesfallwahrsch./Einw./Jahr	1.2E-05	8.0E-06	8.2E-06	1.1E-05	8.9E-06	8.2E-06	9.9E-06	8.6E-06	5.3E-06	8.2E-06	8.7E-06	6.6E-06	6.4E-06	3.0E-06	3.6E-06	5.5E-06	3.4E-06	4.2E-06	2.8E-06
Todesfallrate/Mrd Fzg. Km G _{II}	15.155	15.643	15.477	15.367	15.377	15.194	14.927	14.615	14.283	14.210	14.157	14.127	14.079	14.051	14.023	14.002	13.951	13.912	13.930
Todesfallrate/Mrd Fzg. Km G _I	0.152	0.156	0.155	0.154	0.154	0.152	0.149	0.146	0.143	0.142	0.142	0.141	0.141	0.141	0.140	0.140	0.140	0.139	0.139
Todesfälle pro Jahr (absolut) G _{II}	684.3	690.8	696.9	701.9	706.2	708.1	709.6	712.4	716.4	719.8	725.6	731.4	736.4	741.5	745.9	750.9	759.3	770.2	778.6
Todesfälle pro Jahr (absolut) G _I	6.8	6.9	7.0	7.0	7.1	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.3	7.3	7.4	7.4	7.5	7.5	7.6	7.7	7.8

Abb. 5.11 Statistische Daten zur Ermittlung der Akzeptanzgrenzen.

In Abb. 5.12 ist die Entwicklung der ALARP Grenzen unter Annahme der oben angegebenen Grenzen als Todesfallrate pro Milliarden Fahrzeugkilometer darstellt. Zusätzlich sieht man in Abb. 5.12 als Vergleich die beobachtete Todesfallrate auf Autobahnen in den Jahren 1992 bis 2010. Diese entspricht den Daten, die auch in Abb. 5.9 dargestellt sind.

Zusätzlich sind die Todesfallraten für alle Strassen in der Schweiz dargestellt. Wie erkennbar ist, liegen die Werte von 1992 noch knapp oberhalb des akzeptierbaren Bereichs.

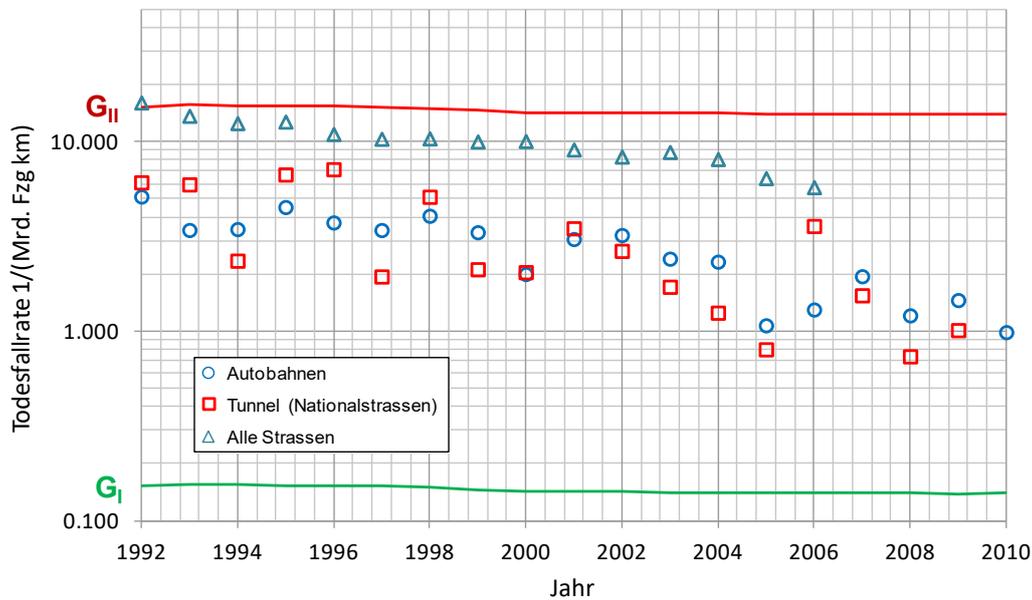


Abb. 5.12 Entwicklung der ALARP Grenzen von 1992 bis 2010 und Darstellung der Todesfallrate auf Autobahnen, Tunneln der Nationalstrasse und alle Strassen in der Schweiz.

Die Grenzen G_I und G_{II} basieren auf absoluten Risikoniveaus für die eine Person, die mit der Aktivität Strassenverkehr verbunden ist. Dieses absolute Risikoniveau ist fixiert, es steigt jedoch einerseits die Verkehrsleistung und die Bevölkerungsanzahl. Berücksichtigt man die verschiedenen Prognosen zur Bevölkerungsentwicklung nach [80] und bezieht den linearen Zusammenhang zwischen Bevölkerungsanzahl und Verkehrsleistung mit ein, so kann eine Prognose für die Entwicklung der Akzeptanzgrenze entwickelt werden. Wie aus Abb. 5.14 erkennbar ist, ist im Mittel mit einer leichten Abnahme der Akzeptanzgrenze G_{II} zu rechnen. Nicht berücksichtigt ist, dass sich generell gesellschaftliche Veränderungen ergeben können, die einen Einfluss auf die absoluten Akzeptanzgrenzen haben könnten.

In Abb. 5.13 sind die oberen und unteren Grenzen des ALARP Bereichs für die Jahre 2012 bis 2050 gegeben.

Abb. 5.13 Prognostizierte Entwicklung des ALARP Bereichs in Abhängigkeit vom Bezugsjahr in Mrd. Fzg. km.

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
G_{II}	13.77	13.57	13.43	13.28	13.14	13.04	12.96	12.88	12.82
G_I	0.138	0.136	0.134	0.133	0.131	0.130	0.130	0.129	0.128

Wie aus Abb. 5.13 ersichtlich wird, verändern sich die Akzeptanzgrenzen im Mittel zeitlich nicht signifikant.

Die Grenzen werden daher wie folgt angegeben:

$$G_{II} = 13.2 \quad [1 / \text{Mrd. Fzg. km}] \quad (61)$$

$$G_I = 0.13 \quad [1 / \text{Mrd. Fzg. km}]$$

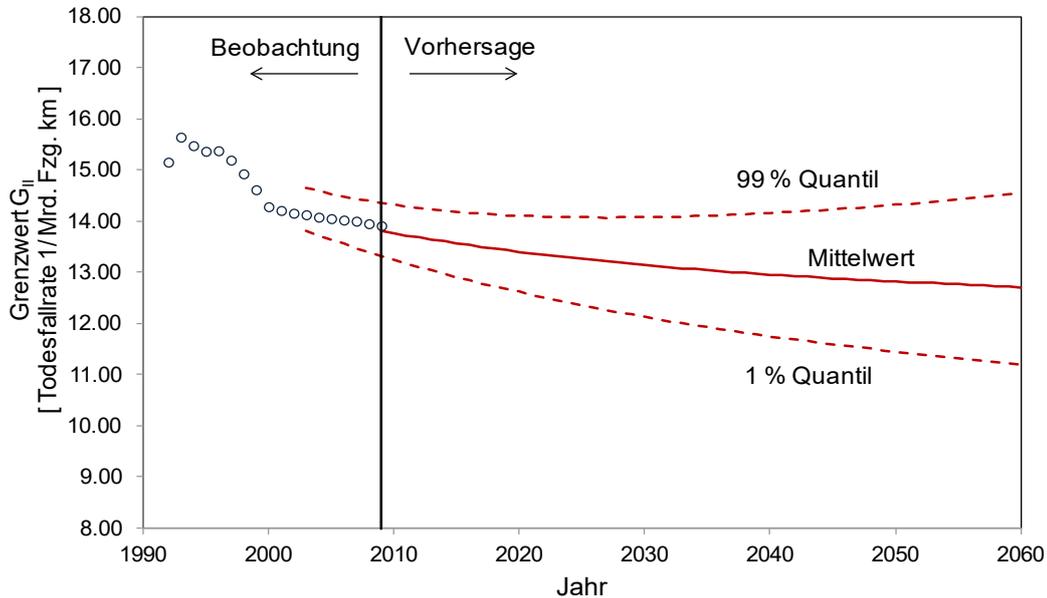


Abb. 5.14 Prognostizierte Entwicklung des ALARP Grenzwertes G_{II} in der Schweiz.

Jedes einzelne homogene Segment im Tunnel, bzw. im Tunnelsystem (gemäss 3.2.4) ist auf diese Akzeptanzkriterien hin zu überprüfen. Werden diese Grenzen in einem Segment nicht eingehalten, so ist der Grund hierfür zu identifizieren, zu dokumentieren und zu beurteilen.

Anschliessend ist der gesamte Tunnel auf die Akzeptanzgrenzen hin zu prüfen. Wenn die Akzeptanzgrenze G_{II} für den gesamten Tunnel überschritten wird, besteht ein unbedingter Handlungsbedarf. Dieser Handlungsbedarf ist begründet in einem ungewöhnlich grossen Risiko für die Verkehrsteilnehmer bei der Anwendung dieser Verkehrsanlage.

Der gesamte Tunnel ist grundsätzlich definiert als das Tunnelsystem, d.h. alle Tunnelkomponenten einschliesslich der Portalzonen für alle möglichen Verkehrsrichtungen.

Falls das Risiko in den Verkehrsrichtungen unterschiedlich ist, wird jede Durchfahrtsstrecke einzeln geprüft.

5.6.2 Individuelle und kollektive Personenrisiken

Für die Beurteilung der Personensicherheit können zwei grundsätzlich verschiedene Standpunkte eingenommen werden: derjenige eines Individuums und derjenige der Gesellschaft als Ganzes. Als Mass für die Gefährdung einer einzelnen Person dient das sogenannte individuelle Risiko. Bezogen auf den Indikator *Todesopfer* bezeichnet es die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Person innerhalb eines Jahres durch eine spezifische Aktivität oder an einem spezifischen Ort ums Leben kommt.

Andererseits ist aus Sicht der Gesellschaft der gesamte Schaden, also die Summe der individuellen Risiken von Interesse, ausgedrückt als kollektives Todesfallrisiko. Dieses Risiko kann beträchtlich sein, auch wenn die einzelnen individuellen Risiken klein sind, sofern eine grosse Zahl von Personen betroffen ist.

Die Zulässigkeit von Handlungsalternativen ist grundsätzlich aus beiden Blickwinkeln zu beurteilen.

Beim individuellen Risiko geht es um den Schutz des einzelnen Lebens, der in jedem Falle gewährleistet sein muss. Es gilt sicherzustellen, dass keine Person durch das betrachtete System übermässig gefährdet wird bzw. das Risiko nicht tragbar ist. Dies kann mittels Grenzwerten erreicht werden, die ungeachtet der Kostenfolgen durch risikoreduzierende Massnahmen einzuhalten sind.

Der Schutz des Individuums liegt in der Verantwortung des Risikoerzeugers. Individuelle Risiken sind beim Verkehrssystem Strasse jedoch im Allgemeinen von untergeordneter Bedeutung und betreffen hauptsächlich die Arbeitssicherheit. Massgebend für die Beurteilung der Risiken sind daher die kollektiven Risiken. Sicherheitsbereiche, in denen Personen durch ihre exponierte Tätigkeit ein hohes individuelles Risiko aufweisen, sind stark reguliert und den Rahmenbedingungen des entsprechenden Sicherheitsbereiches unterworfen. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Risikobewertung verzichtet, zusätzliche explizite Kriterien für individuelle Risiken zu formulieren, die sich auf Einzelfälle beziehen.

Die nachstehend erläuterten Kriterien zur Bewertung der Zulässigkeit von Handlungsalternativen beziehen sich daher ausschliesslich auf kollektive Todesfallrisiken.

5.6.3 Grenzkosten MRS

Die Grenzkosten (*Marginal Cost of Substitution* MRS) entsprechen den marginalen Kosten, die zumutbar sind, um den letzten Todesfall noch zu verhindern. Diese Kosten entsprechen keinem Wert eines Menschenlebens und sind keine Durchschnittskosten. Eine kurze Einleitung zu den Grenzkosten wird in Anhang II gegeben.

Die Grenzkosten werden vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE (www.are.admin.ch) bestimmt (*Value of statistical life (VOSL): empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz*).

$$MRS = VOSL \text{ (Bundesamt für Raumentwicklung ARE) [CHF]} \quad (62)$$

Dieser Wert entspricht in etwa dem Mittelwert aus verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Grenzkosten [82], [28] und liegt derzeit in der Grössenordnung, die auch der Life Quality Index (LQI) liefert und der vom JCSS zur Anwendung empfohlen wird [83].

Der Wert der Grenzkosten ist allgemein abhängig von der technischen Entwicklung in einem Land und von der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit. Da sich beides über die Zeit ändert, sollte dieser Wert periodisch überprüft und angepasst werden. Es gibt verschiedene Verfahren, um diesen Wert zu bestimmen. Einige sind in [84] zusammengestellt.

5.6.4 Akzeptanzkriterien in der Störfallverordnung als Randbedingung

Für die Analyse und Beurteilung der Risiken aus dem Gefahrguttransport durch Strassentunnel legen in der Schweiz folgende regulative Anforderungen die zu beachtenden rechtlichen Rahmenbedingungen vor [24]:

- Verordnung zum Schutz vor Störfällen, Störfallverordnung (StFV) [3];
- Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (SDR) [6].

Diese Rahmenbedingungen sind einzuhalten und gemäss [24] zu beurteilen.

Die Berechnung der Störfallereignisse unterstützt, ersetzt jedoch das Vorgehen gemäss [24] nicht.

Die in dieser Dokumentation ausgeführten Akzeptanzkriterien haben keinen Einfluss auf die rechtlichen Anforderungen und festgelegten Vorgehensweisen gemäss Störfallverordnung.

Es ist darauf zu achten, dass die Grundannahmen und -daten aller Risikobeurteilung aufeinander abgestimmt sein müssen [7].

5.6.5 Tolerierbares Risiko und Massnahmenakzeptanz M_{Akt}

Das tolerierbare Risiko wird definiert dadurch, dass das Risikoniveau unterhalb der in Kapitel 5.6.1 definierten G_I Grenze liegt. Liegt das Risikoniveau unterhalb der G_{II} Grenze ist es auch tolerierbar, wenn es keine effiziente Massnahme oder Massnahmenkombination gibt, die das Risiko Effizienzkriterium nach Gleichung (63) erfüllen.

Die Tolerierbarkeit des Risikos wird allgemein beurteilt durch das Massnahmenkriterium M_{Akt} , welches sich aus der Massnahmeneffizienz ableitet:

$$M_{Akt} = (M_{Nu} \cdot MRS / M_{Ko}) \geq 1.0 \quad (63)$$

Ist Gleichung (63) erfüllt, so ist die Massnahme M_i akzeptabel. Als weiteres Kriterium muss geprüft werden, ob andere Randbedingungen oder gesetzliche Vorgaben existieren, die die Akzeptierbarkeit trotz Erfüllung der Massnahme (63) verhindern. Dies bedeutet, dass Gleichung (63) ein hinreichendes, aber kein notwendiges Kriterium ist.

5.7 Bewertung von Massnahmen und Massnahmenkombinationen

Wichtige Vorbemerkung die Grenzkosten betreffend:

Im folgenden Kapitel 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*).

Ist gemäss [12] erforderlich eine Risikobeurteilung durchzuführen, und liegt das Risiko im Tunnel über dem unteren Grenzwert gemäss Kapitel 5.6.1, so muss geprüft werden, ob Massnahmen existieren, die das Risiko verringern (Kapitel 5.2).

Generell sind bei der Bewertung von Massnahmen zwei prinzipielle Fälle zu unterscheiden:

- I. Das Risiko im Tunnel liegt unterhalb des oberen Grenzwertes (G_{II}) gemäss Kapitel 5.6.1.
- II. Das Risiko im Tunnel liegt über dem oberen Grenzwert (G_{II}) gemäss Kapitel 5.6.1.

Fall I: Tunnelrisiko liegt unter dem oberen Grenzwert G_{II}

In diesem Fall bestimmt das Grenzkostenkriterium, welches Risiko toleriert werden kann. Hierzu sind die folgenden Schritte durchzuführen:

- Zusammenstellung aller technisch möglichen Massnahmen.

Es werden zunächst alle möglichen Massnahmen gemäss Kapitel 5.2 zusammengestellt und gemäss 5.4 die jährlichen Kosten für die Massnahmen bestimmt.

- Ermittlung der Risiken (Kapitel 4) und der Risikoreduktion und der Effizienz (Kapitel 5.5).

Im nächsten Schritt werden die Risiken berechnet unter der Annahme, dass die Massnahmen einzeln ausgeführt worden sind, sowie, dass Massnahmenpakete umgesetzt worden sind. Damit lassen sich für jede Massnahme und jede Massnahmenkombination das Grenzkostenkriterium auswerten (Kapitel 5.6.3). In Abb. 5.15 ist eine Beispieldarstellung für fünf verschiedene Massnahmen gegeben.

Abb. 5.15 Beispiel für die Darstellung der Risiken zur Bewertung von Einzelmassnahmen.

Massnahme i	M_{Ko}	M_{Nu}	$M_{Nu} MRS$	$(M_{Nu} MRS) / M_{Ko}$
M1	547'768	0.1509	754'490	1.38
M2	510'296	0.0021	10'620	0.02
M3	1'326'770	0.0538	269'000	0.2
M4	709'429	0.6860	3'429'970	4.83
M5	2'475'411	0.8013	4'006'770	1.62

- Darstellung der Massnahmen in einem Akzeptanzdiagramm

Die Massnahmen werden anschliessend in einem Akzeptanzdiagramm dargestellt, wie es beispielhaft in Abb. 5.16 illustriert ist. Hierin ist die rote gestrichelte Linie die Akzeptanzgerade mit einer Steigung von 1. Gemäss dem Grenzkostenkriterium sind alle Massnahmen akzeptierbar, die oberhalb dieser Geraden liegen. Der nicht akzeptierbare Bereich ist grau hinterlegt. Um den Gradienten der Effizienz der Massnahmen darzustellen, sind die blauen Linien in Abb. 5.16 eingetragen. Aus ihrer Steigung kann direkt die Effizienz abgelesen werden. Im dargestellten Beispiel ist die Massnahme M4 die Massnahme mit der grössten Effizienz.

- Bilden von Massnahmenkombinationen.

Lassen sich aus den akzeptierbaren Einzelmassnahmen sinnvolle Massnahmenkombinationen ableiten, so ist im nächsten Schritt, beginnend mit der effizientesten Einzelmassnahme die, Kombination der Massnahmen zu bewerten.

Dabei ist die mögliche gegenseitige Beeinflussung der Massnahmen unbedingt zu berücksichtigen. Die Kombination der Massnahmen ist nicht in jedem Fall eine Summation der Einzelmassnahmen.

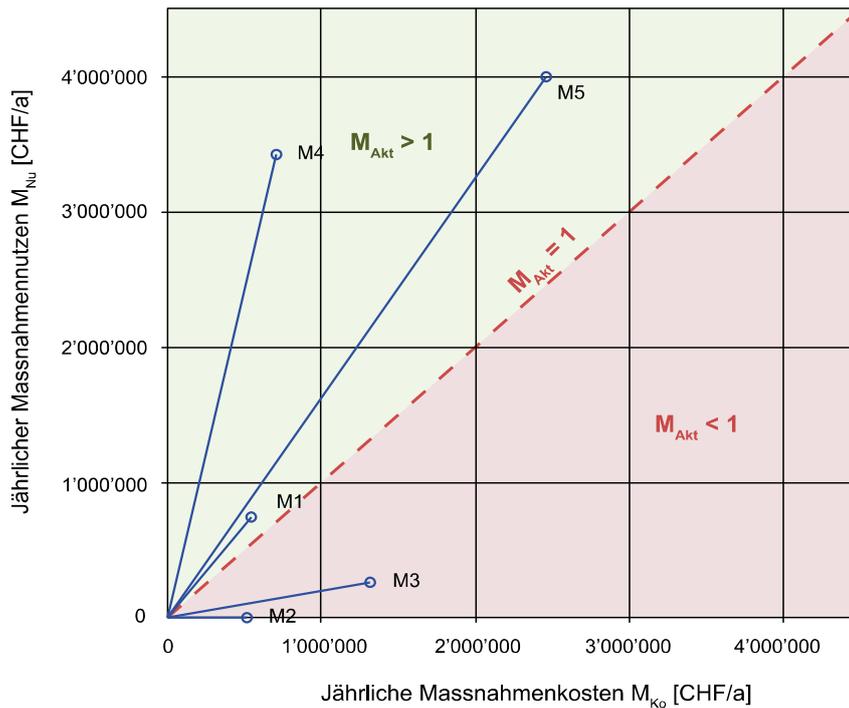


Abb. 5.16 Bewertung der Akzeptanz von Einzelmassnahmen anhand eines Beispiels mit fünf diskreten Massnahmenvarianten M1 bis M5.

In diesem Beispiel beeinflussen sich die einzelnen Massnahmen. Beim Massnahmenpaket M4-M5 und M4-M5-M1 beeinflussen sich die Massnahmen nicht gegenseitig und Nutzen und Kosten sind rein additiv. Durch Hinzunahme von M3 und M2 ist dies nicht mehr der Fall. Die Werte sind in Abb. 5.17 gegeben.

Abb. 5.17 Beispiel für die Darstellung der Risiken zur Bewertung der Massnahmenkombinationen.

Massnahme i	ΣM_{Ko}	$\Sigma M_{Nu} MRS$	$\Sigma M_{Nu} MRS / \Delta \Sigma M_{Ko}$
M4	709'429	3'429'970	4.83
M4-M5	3'184'839	7'436'740	1.62
M4-M5-M1	3'732'608	8'191'230	1.38
M4-M5-M1-M3 ²	4'409'221	8'560'230	0.54
M4-M5-M1-M3-M2 ³	4'859'517	8'706'605	0.33

² Beim Massnahmenpaket M4-M5-M1-M3 beeinflussen sich sowohl die Massnahmenkosten als auch der Massnahmennutzen gegenseitig, so dass die Werte nicht einer einfachen Summierung der Einzelmassnahmen entsprechen.

³ Durch Hinzunahme der Massnahme M2 zum Paket M4-M5-M1-M3 beeinflusst sich der Massnahmennutzen gegenseitig. Der Gesamtnutzen entspricht nicht der Summe der einzelnen Massnahmennutzenwerte.

Die Massnahmenkombination wird sukzessive ausgebaut, d.h. es wird mit einer Massnahme begonnen und in jedem Schritt eine weitere hinzugefügt. Aus jeder möglichen Massnahmenkombination ist diejenige auszuwählen, bei der der Abstand zwischen der Akzeptanzgeraden und einer virtuellen Parallele zur Akzeptanzgerade maximal wird.

Diese liegt auf der Umhüllenden. Im Beispiel, welches in Abb. 5.18 gegeben ist, entspricht dies der Massnahmenkombination M4-M5-M1.

- Identifizierung der optimalen Massnahmenkombination

Durch die Verschiebung der Akzeptanzgerade lässt sich die optimale Massnahmenkombination bestimmen. Im Beispiel ist dies die Kombination M5-M4-M1. Durch das Grenzkostenkriterium ist gegeben, dass jeweils die Risikoänderung von einer Massnahme zur nächsten beurteilt wird und nicht die totale Risikoreduktion aller Massnahmen gemeinsam. Würden im Vergleich dazu die Grenzkosten als Durchschnittskosten interpretiert, so wäre auch die Massnahmenkombination M4-M5-M1-M3 akzeptierbar. Dieses Vorgehen führt zu suboptimalen Lösungen.

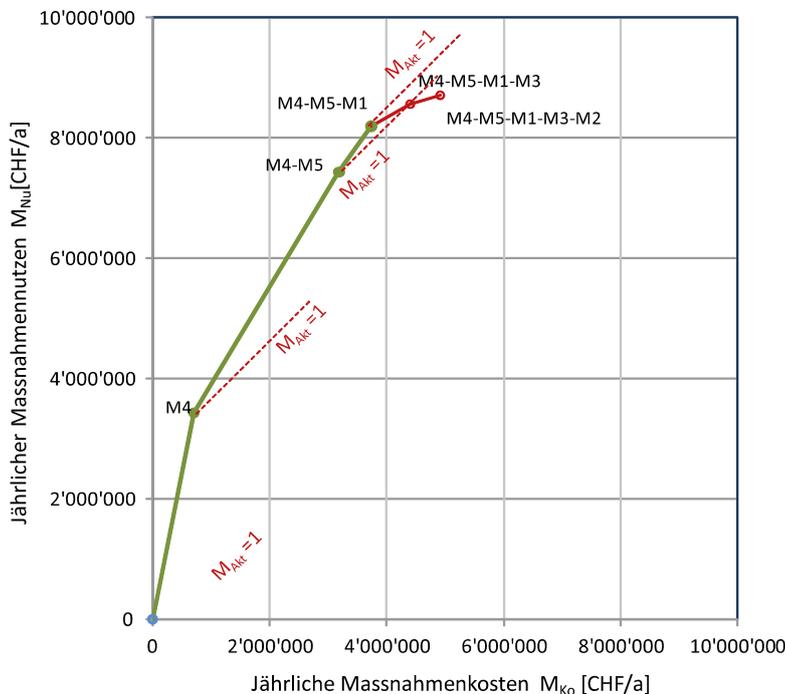


Abb. 5.18 Bewertung der Akzeptanz von Massnahmenpaketen anhand eines Beispiels mit fünf diskreten Massnahmenvarianten M1 bis M5.

Ein Sonderfall besteht, wenn es nur eine Massnahme gibt, die technisch sinnvoll ist, oder mehrere Massnahmen sich gegenseitig ausschliessen und damit nicht kombinierbar sind. Dies kann insbesondere dann der Fall sein, wenn gemäss ALARP Prinzip bereits verschiedene Massnahmen durchgeführt werden müssen, um das Risiko unter den oberen Grenzwert zu bringen. Hat man dies erreicht, wird, wie in diesem Kapitel beschrieben, geprüft, ob es effizient ist, das Risiko weiter zu minimieren. In diesem Fall ist der Massnahmenkatalog meist sehr begrenzt.

Das Grenzkostenprinzip gemäss Kapitel 5.6.3 basiert auf der Idee, dass die Kosten für den letzten verhinderten Todesfall eine bestimmte Summe nicht übersteigen sollten.

Steht nur eine Massnahme zur Verfügung oder nur diskrete Massnahmen, die nicht kombiniert werden können, so werden bei der Bewertung die Grenzkosten als Durchschnittskosten betrachtet.

Die oben gemachten Ausführungen zu Massnahmenpaketen behalten dabei ihre Gültigkeit.

Abschliessend ist die optimale Massnahmenkombination zu dokumentieren. Diese dient dem Entscheidungsträger als Informationsbasis für den informierten Entscheidungsprozess. Gegebenenfalls sind im Entscheidungsprozess weitere Aspekte (politische Präferenzen oder gesellschaftliche Präferenzen) mit einzubeziehen.

Fall II: Tunnelrisiko liegt über dem oberen ALARP Grenzwert G_{II}

Übersteigt das Risiko in einem Tunnelsegment den oberen Grenzwert G_{II} , der in Kapitel 5.6.1 definiert ist (G_{II}), so sind Massnahmen unabhängig von den damit verbundenen Kosten auszuführen. Das Risiko im Tunnel ist per Definition nicht akzeptierbar und für einen weiteren Betrieb des Tunnels sind risikoreduzierende Massnahmen durchzuführen.

In diesem Fall muss eine oder mehrere der zur Verfügung stehenden Massnahmen das Risiko so weit reduzieren, dass es unter dem oberen Grenzwert liegt.

Das allgemeine Vorgehen wird im Folgenden beschrieben.

- Zusammenstellung aller technisch möglichen Massnahmen. Dies erfolgt analog zum Fall I
- Ermittlung der Risiken (Kapitel 4) und der Risikoreduktion und der Effizienz (Kapitel 5.5). Hier wird das Risiko für jede Massnahme einzeln berechnet und geprüft, ob es eine oder mehrere Massnahmen gibt, die das Risiko unter die obere Grenze des ALARP Prinzips bringen.

Gibt es nur eine Massnahme, so ist diese zur Ausführung vorzuschlagen. Die anderen Massnahmen werden auf ihre Akzeptanz gemäss der Beschreibung von Fall I beurteilt. Erfüllen mehrere Massnahmen diese Anforderung, so ist diejenige Massnahme vorzuschlagen, die die grösste Effizienz nach Kapitel 5.5 besitzt. Die anderen Massnahmen werden auf ihre Akzeptanz gemäss der Beschreibung von Fall I beurteilt.

Erfüllt keine Massnahme diese Anforderung, so sind analog zu Fall I sinnvolle Massnahmenkombinationen zu bilden.

Abb. 5.19 Beispiel für die Massnahmenplanung im Fall II.

Massnahme i	ΣM_{Ko}	T_R	M_{Eff}	$T_R < G_{II}$
Ohne	0	16.73		Nein
D4	100'000	15.48	2.70E+05	Nein
D4-D2	236'498	14.65	6.76E+05	Nein
D4-D2-D1	569'882	13.39	1.78E+06	Nein
D4-D2-D1-D3	1'123'544	12.55	3.75E+06	Ja

Ein Beispiel mit vier verschiedenen Massnahmen (D1-D4) ist in Abb. 5.19 dargestellt. Auch in diesem Fall ist mit der effizientesten Massnahme zu beginnen. Es wird bei jeder Hinzunahme einer weiteren Massnahme geprüft, ob das Risiko damit unterhalb des oberen Grenzwerts des ALARP Bereichs liegt. Ist dies nicht der Fall, so sind weitere Massnahmen durchzuführen. Im Beispiel ist dies bei Massnahmenpaket D4-D2-D1-D3 erfüllt. Alle anderen möglichen Massnahmen werden auf ihre Akzeptanz gemäss der Beschreibung von Fall I beurteilt.

Eine graphische Darstellung ist in Abb. 5.20 gegeben. Folgt man dem roten Pfad, so ist erkennbar, dass das Risiko bis zur Massnahmenkombination D4-D5-D1 noch nicht tolerierbar ist. Erst die Umsetzung der Massnahmen D4-D5-D1-D3 reduziert das Risiko soweit, dass es innerhalb des ALARP Bereiches liegt. Gibt es dann keine weiteren Massnahmen, die das Risiko effizient reduzieren (Prüfung mit Grenzkostenkriterium), so sind die minimalen Anforderungen erfüllt und das verbleibende Risiko wird akzeptiert bzw. toleriert.

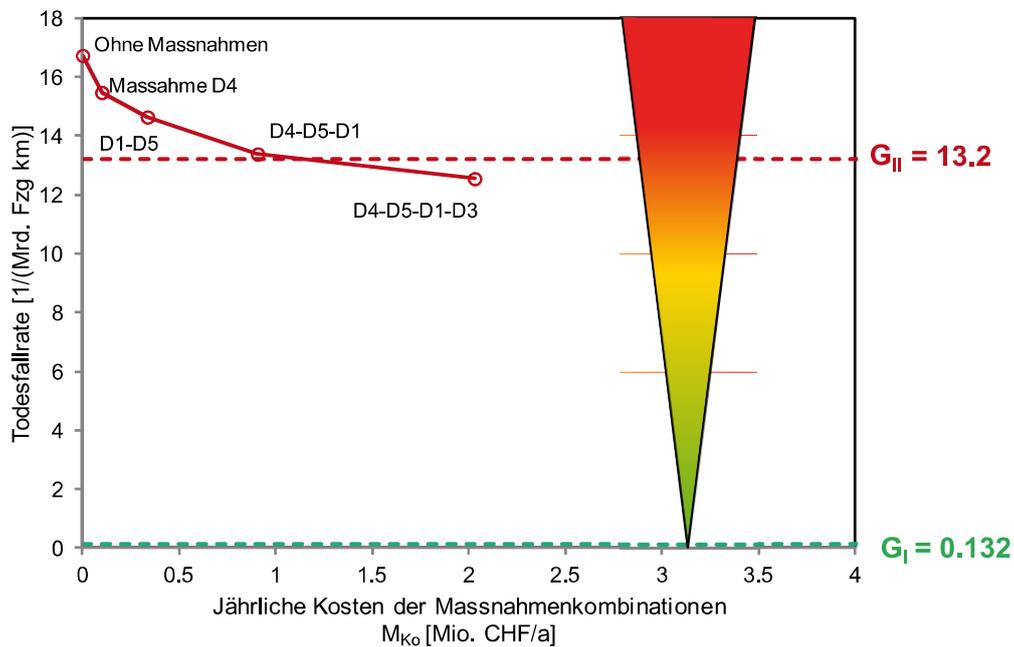


Abb. 5.20 Bewertung der Akzeptanz von Einzelmassnahmen anhand eines Beispiels mit vier diskreten Massnahmenvarianten der Einzelmassnahmen D1 bis D5.

6 Darstellung der Risikobeurteilung

6.1 Allgemeines

Die Darstellung der Risikobeurteilung soll zu folgenden Fragen Aussagen machen und entsprechende Produkte (Diagramme, Tabellen) bereitstellen:

- Auswertung und graphische Darstellung der Unfallrate über die Tunnellänge, getrennt für die einzelnen Tunnelkomponenten und Richtungen für die homogenen Segmente;
- Auswertung und graphische Darstellung der Todesfall- und Verletztenrate über die Tunnellänge, getrennt für die einzelnen Tunnelkomponenten und Richtungen für die homogenen Segmente;
- Auswertung und graphische Darstellung der Brandereignisrate über die Tunnellänge, getrennt für die einzelnen Tunnelkomponenten und Richtungen für die homogenen Segmente;
- Auswertung und graphische Darstellung der Überschreitungshäufigkeit von Todesfällen infolge Gefahrgutereignissen im Tunnel, gemittelt und normiert auf 100 m;
- Tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse für die gesamte Tunnelanlage;
- Tabellarische Darstellung der Massnahmen/Massnahmenpakete, der Effizienz und der Handlungsempfehlungen;
- Technischer Risikobericht mit der Darstellung und Diskussion der massgebenden Grundlagen (siehe 6.4).

6.2 Graphische Darstellungen

Die graphische Darstellung der Unfallrate über die Tunnellänge getrennt für die einzelnen Tunnelkomponenten und Richtungen für die homogenen Segmente dient dazu, die Problemstellen innerhalb des Tunnels zu identifizieren.

Die Darstellung der Bewertung der Einzelmassnahmen und Massnahmenkombinationen erfolgt analog zu Abb. 5.16 und Abb. 5.18.

6.3 Tabellarische Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der erwarteten Anzahl der Ereignisse pro Jahr sowie der Ereignisraten ist für die gesamte Tunnelanlage zu erstellen.

6.4 Risikobericht

Als Grundlage der Entscheidungsfindung ist die Risikobeurteilung in einem Risikobericht zusammenzustellen. In diesem Bericht sind alle Annahmen, die getroffen wurden, sowie alle Eingabewerte zu erläutern und nachvollziehbar zu belegen. Der Risikobericht folgt in seiner Struktur der Prozedur der allgemeinen Risikobeurteilung, die in Abb. 2.7 in Kapitel 2.9 dargestellt ist. Die Gliederung des Risikoberichts ist in [12] vorgegeben.

Anhänge

I	A-priori Modelle für die Indikatoren	147
I.1	Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen.....	147
I.1.1	Zeitvariationskurven	147
I.1.2	Tageszeit.....	147
I.1.3	Verkehrsmenge.....	147
I.1.4	Anteil Schwerverkehr	147
I.1.5	Stau	147
I.1.6	Geschwindigkeit	147
I.1.7	Zonen	148
I.1.8	Einfahrt / Ausfahrt	148
I.1.9	Kurvenradius	150
I.1.10	Längsneigung.....	151
I.1.11	Fahrspurbreite	152
I.1.12	Anzahl Fahrspuren.....	152
I.1.13	Verkehrsführung.....	152
I.1.14	Abstand Notausgänge.....	152
I.1.15	Beleuchtung	152
I.1.16	Lüftungssystem	153
I.1.17	Gesamtlänge des Tunnels	153
I.1.18	Lüftungsstrategie.....	153
I.1.19	Notbeleuchtung	154
I.1.20	Überwachungssysteme.....	154
I.2	Gefahrgutereignisse	154
I.2.1	ADR Klasse	154
I.2.2	Quergefälle.....	154
I.2.3	Entwässerungssystem	155
I.2.4	Abstand Einlaufschächte.....	155
I.2.5	Öffnungsgrösse der Schlitzrinne	156
II	Das Grenzkostenprinzip	157
III	Bayes'sche Netze	160
III.1	Bayes'sche Netze zur Systemmodellierung.....	160
III.2	Bestandteile Bayes'scher Netze	160
III.3	Abhängigkeiten in Netzen	161
III.4	Wahrscheinlichkeiten und Inferenzberechnungen	162
III.5	Verwendung von Datensätzen in Modellen	165
III.6	Aktualisierung unter Verwendung von Datensätzen	166

I A-priori Modelle für die Indikatoren

I.1 Verkehrsunfälle und mechanische/elektrische Überhitzung von Fahrzeugen

In den folgenden Kapiteln sind die *a-priori* Verteilungen der einzelnen Indikatoren zusammengestellt.

I.1.1 Zeitvariationskurven

Aus den Statistiken in [17] kann die *a-priori* Verteilung für die Schweiz abgeleitet werden. Da die Typen A und F nicht unterschieden werden, wird eine Verteilung analog zur Verteilung in Deutschland angenommen. Die *a-priori* Verteilungen für die Zeitvariationskurven sind in Abb. I.1 gegeben.

Abb. I.1 A-priori Verteilungen der verschiedenen Zeitvariationskurven.

Typ	A-priori Verteilung	
	Schweiz [17]	Deutschland [53]
Typ A	0.05	0.08
Typ B	0.16	0.15
Typ C	0.12	0.15
Typ D	0.32	0.24
Typ E	0.26	0.25
Typ F	0.10	0.12

Die *a-priori* Verteilungen müssen verwendet werden, wenn keine andere Informationen über den Typ der Ganglinie vorliegen.

I.1.2 Tageszeit

Die Tageszeit ist gleichverteilt über alle 24 Stunden des Tages.

I.1.3 Verkehrsmenge

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da die Verkehrsmenge als einer der wesentlichen Risikoindikatoren bekannt sein muss, um eine Berechnung durchzuführen (siehe [12]).

I.1.4 Anteil Schwerverkehr

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz dieser Anteil bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.5 Stau

Ist keine Information vorhanden, so kann für die Schweiz mit einer *a-priori* Wahrscheinlichkeit für Stau von 0.0114/Jahr gerechnet werden. Dies entspricht etwa 100 Staustunden pro Jahr. Diese kann je nach Lage oder vorhandener Zusatzinformation angepasst werden.

I.1.6 Geschwindigkeit

Falls in einer Projektphase die signalisierte Geschwindigkeit noch nicht bekannt ist, kann mit der *a-priori* Verteilung der signalisierten Geschwindigkeiten gerechnet werden, die in Abb. I.2 gegeben ist.

Abb. I.2 A-priori Wahrscheinlichkeiten der Geschwindigkeiten im Tunnel in Abhängigkeit von der Verkehrsführung.

Signalisierte Geschwindigkeit [km/h]	Gegenverkehr	Richtungsverkehr
40	0.001	0.001
50	0.001	0.001
60	0.03	0.014
70	0.001	0.001
80	0.95	0.08
90	0.001	0.001
100	0.014	0.90
110	0.001	0.001
120	0.001	0.001
130	0	0
140	0	0

I.1.7 Zonen

Die Zonen sind direkt über die Tunnelgeometrie determiniert. Diese Information über den Tunnel steht immer zur Verfügung, und es gibt diesbezüglich keine Unsicherheiten.

I.1.8 Einfahrt / Ausfahrt

Ein- und Ausfahrten im Tunnel sind selten. Die meisten homogenen Segmente im Tunnel werden weder eine Ein-, noch eine Ausfahrt haben. Da keine Daten über die Ein- und Ausfahrten in Tunneln vorliegen, wird die *a-priori* Verteilung abgeschätzt. Dabei ist berücksichtigt, dass die Kombinationen von Ein- und Ausfahrten sehr selten sind. Die *a-priori* Verteilung ist in Abb. I.3 gegeben.

Abb. I.3 A-priori Wahrscheinlichkeiten der Ein- und Ausfahrtbedingungen.

	Länge der Einfahrt	Länge der Ausfahrt	A-priori Verteilung
Keine Einfahrt/Ausfahrt	-	-	9.85E-01
Einfahrt	$0 \times l_{req}$	-	5.10E-05
	$0.5 \times l_{req}$		1.53E-03
	$1.0 \times l_{req}$		3.06E-03
	$2.0 \times l_{req}$		4.59E-04
Ausfahrt	-	$0 \times l_{req}$	1.02E-04
		$0.5 \times l_{req}$	1.28E-03
		$1.0 \times l_{req}$	2.55E-03
		$2.0 \times l_{req}$	1.17E-03
Kombination I	$0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	7.50E-09
	$0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	7.50E-07
	$0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	2.25E-04

Abb. 1.3 A-priori Wahrscheinlichkeiten der Ein- und Ausfahrtbedingungen.

	Länge der Einfahrt	Länge der Ausfahrt	A-priori Verteilung
	$0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	1.50E-04
	$0.5 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	7.50E-07
	$0.5 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	1.50E-04
	$0.5 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	1.50E-04
	$0.5 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	1.50E-04
	$1.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	5.99E-04
	$1.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	4.49E-04
	$1.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	2.25E-04
	$1.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	3.00E-04
	$2.0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$	1.50E-04
	$2.0 \times l_{req}$	$0.5 \times l_{req}$	1.50E-04
	$2.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	1.50E-04
	$2.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	1.50E-04
	Kombination II	$0 \times l_{req}$	$0 \times l_{req}$
$0 \times l_{req}$		$0.5 \times l_{req}$	4.50E-07
$0 \times l_{req}$		$1.0 \times l_{req}$	1.35E-04
$0 \times l_{req}$		$2.0 \times l_{req}$	9.00E-05
$0.5 \times l_{req}$		$0 \times l_{req}$	4.50E-07
$0.5 \times l_{req}$		$0.5 \times l_{req}$	9.00E-05
$0.5 \times l_{req}$		$1.0 \times l_{req}$	9.00E-05
$0.5 \times l_{req}$		$2.0 \times l_{req}$	9.00E-05
$1.0 \times l_{req}$		$0 \times l_{req}$	3.60E-04
$1.0 \times l_{req}$		$0.5 \times l_{req}$	2.70E-04
$1.0 \times l_{req}$		$1.0 \times l_{req}$	1.35E-04
$1.0 \times l_{req}$		$2.0 \times l_{req}$	1.80E-04
$2.0 \times l_{req}$		$0 \times l_{req}$	9.00E-05
$2.0 \times l_{req}$		$0.5 \times l_{req}$	9.00E-05
$2.0 \times l_{req}$	$1.0 \times l_{req}$	9.00E-05	
$2.0 \times l_{req}$	$2.0 \times l_{req}$	9.00E-05	

I.1.9 Kurvenradius

Falls keine Informationen über den Kurvenradius eines Segmentes vorhanden ist, so kann mit der *a-priori* Verteilung des Kurvenradius für ein Segment gerechnet werden. Diese ist in Abb. I.4 gegeben.

Abb. I.4 A-priori Wahrscheinlichkeit des Kurvenradius.

Radius [m]	A-priori Verteilung
0 - 50	0.0011
50 - 60	0.0002
60 - 70	0.0003
70 - 80	0.0003
80 - 90	0.0004
90 - 100	0.0004
100 - 110	0.0005
110 - 120	0.0006
120 - 130	0.0007
130 - 140	0.0008
140 - 150	0.0009
150 - 160	0.0010
160 - 170	0.0012
170 - 180	0.0014
180 - 190	0.0016
190 - 200	0.0018
200 - 250	0.0128
250 - 300	0.0219
300 - 350	0.0346
350 - 400	0.0508
400 - 450	0.0691
450 - 500	0.0869
500 - 550	0.1013
550 - 600	0.1094
600 - 650	0.1094
650 - 700	0.1013
700 - 800	0.1560
800 - 900	0.0855
900 - ∞	0.0478

I.1.10 Längsneigung

Falls keine Informationen zur Längsneigung in einem Segment verfügbar sind, so kann mit der *a-priori* Verteilung gerechnet werden. Diese ist in Abb. I.5 gegeben.

Abb. I.5 A-priori Wahrscheinlichkeit der Längsneigung.

Längsneigung in den Tunnelsegmenten [%]	A-priori Verteilung
0.00 – 0.25	4.76E-02
0.25 -0.50	2.38E-02
0.50 – 0.75	2.38E-02
0.75 – 1.00	9.52E-02
1.00 – 1.25	1.19E-01
1.25 – 1.50	4.76E-02
1.50 – 1.75	1.19E-01
1.75 – 2.00	7.14E-02
2.00 – 2.25	2.38E-02
2.25 – 2.50	2.38E-02
2.50 – 2.75	1.00E-05
2.75 – 3.00	1.19E-01
3.00 – 3.50	4.76E-02
3.50 – 4.00	1.00E-05
4.00 – 4.50	4.76E-02
4.50 – 5.00	2.38E-02
5.00 – 5.50	7.14E-02
5.50 – 6.00	2.38E-02
6.00 – 6.50	4.76E-02
6.50 – 7.00	1.00E-05
7.00 – 7.50	2.38E-02
7.50 – 8.00	1.00E-05
8.00 – 8.50	1.00E-05
8.50 – 9.00	1.00E-05
9.00 – 9.50	1.00E-05
9.50 – 10.00	1.00E-05
10.00 – 10.50	1.00E-05

I.1.11 Fahrspurbreite

Ist die Fahrspurbreite nicht bekannt, so kann mit einer *a-priori* Verteilung die Fahrspurbreite gerechnet werden. Diese ist in Abb. I.6 gegeben und stammt aus Daten von [50].

Abb. I.6 A-priori Wahrscheinlichkeit der Fahrspurbreite.

Fahrspurbreite [m]	A-priori Verteilung
0.00 - 3.00	0.001
3.00 - 3.25	0.026
3.25 - 3.50	0.51
3.50 - 3.75	0.40
3.75 - 4.00	0.02
4.00 - 4.25	0.04
4.25 - 4.50	0.001
4.50 - 4.75	0.001
4.75 - 5.00	0.001

I.1.12 Anzahl Fahrspuren

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz die Anzahl Fahrspuren bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.13 Verkehrsführung

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz die Verkehrsführung bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.14 Abstand Notausgänge

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz die Abstände der Notausgänge bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.15 Beleuchtung

Daten, um eine *a-priori* Information über die Tunnelbeleuchtung in der Schweiz zu berechnen, sind nicht verfügbar. Generell sind die Tunnel in der Schweiz jedoch gut beleuchtet und die Wahrscheinlichkeit für eine geringe Leuchtdichte in Tunneln ist eher gering. Die Werte in Abb. I.7 basieren auf Expertenschätzungen.

Abb. I.7 A-priori Verteilungen der äquivalenten Leuchtdichte im Tunnel in Abhängigkeit von der Zone.

Tunnel Beleuchtung [cd/m ²]	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
	äquivalente Leuchtdichte		Leuchtdichte		
< 0.5	0.050	0.050	0.001	0.001	0.001
0.5 - 1	0.200	0.200	0.050	0.050	0.050
1-2	0.500	0.500	0.200	0.200	0.100
2-3	0.200	0.200	0.500	0.400	0.300
3-4	0.047	0.047	0.200	0.300	0.400
4-5	0.001	0.001	0.047	0.047	0.147
6-8	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
> 8	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Abb. I.7 bezieht sich auf die äquivalenten Leuchtdichten und spiegeln nicht die tatsächlichen Leuchtdichten in den jeweiligen Zonen 2 und 3 wieder.

I.1.16 Lüftungssystem

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz das Lüftungssystem bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.17 Gesamtlänge des Tunnels

Eine *a-priori* Verteilung wird hier nicht angegeben, da sowohl im vereinfachten als auch im detaillierten Ansatz die Länge des Tunnels bekannt sein muss (siehe [12]).

I.1.18 Lüftungsstrategie

Falls keine Information zur Lüftungsstrategie im Tunnel verfügbar ist, so kann mit der folgenden *a-priori* Verteilung gerechnet werden, die in Abhängigkeit des Lüftungssystems wie folgt definiert ist:

Abb. I.8 A-priori Verteilungen der Lüftungsstrategien.

Lüftungsstrategie	Lüftungssystem				
	1	2	3	4	5
Strategie für flüssigen Verkehr	0.4999	0.49	0.2	0.49	0.3
Strategie für Stau	0.4999	0.49	0.7	0.49	0.5
Staudetektion	0.0002	0.02	0.1	0.02	0.2

Die Nummerierung der Lüftungssysteme ist:

1. Natürliche Lüftung
2. Längslüftung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
3. Längslüftung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
4. Rauchabsaugung ohne Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit
5. Rauchabsaugung mit Regelung der Längsströmungsgeschwindigkeit

I.1.19 Notbeleuchtung

Falls keine Information zur Notbeleuchtung im Tunnel verfügbar ist, so kann mit der *a-priori* Verteilung zum Vorhandensein einer Notbeleuchtung gerechnet werden. Diese ist in Abb. I.9 gegeben.

Abb. I.9 A-priori Verteilungen der Notbeleuchtung im Tunnel.

Notbeleuchtung	A-priori Verteilung
Ja	0.95
Nein	0.05

I.1.20 Überwachungssysteme

Falls keine Information zum Überwachungssystem im Tunnel verfügbar ist, so kann mit der *a-priori* Verteilung zum Vorhandensein eines Überwachungssystems gerechnet werden. Diese ist in Abb. I.10 gegeben.

Abb. I.10 A-priori Verteilungen für das Überwachungssystem im Tunnel.

Überwachungssystem	A-priori Verteilung
Ja	0.90
Nein	0.10

I.2 Gefahrgutereignisse

I.2.1 ADR Klasse

Ist die ADR Klasse für einen Tunnel unbekannt, so kann mit der *a-priori* Wahrscheinlichkeit gerechnet werden. Derzeit fallen in der Schweiz ca. 5 % der Tunnel in die Kategorie E. 95 % aller Tunnel haben keine Beschränkung. Damit ergibt sich die *a-priori* Verteilung gemäss Abb. I.11:

Abb. I.11 A-priori Verteilungen der ADR Tunnelklassen.

Tunnelklasse	A-priori Verteilung
A	0.95
B	0.001
C	0.001
D	0.001
E	0.047

I.2.2 Quergefälle

Die *a-priori* Verteilung für das Quergefälle in Tunneln ist in Abb. I.12 gegeben. Da keine Statistik über das Quergefälle vorhanden ist, entspricht die *a-priori* Verteilung einer Expertenschätzung.

Abb. I.12 A-priori Verteilungen des Quergefalles im Tunnel.

Quergefälle [%]	A-priori Verteilung
0.00 - 0.50	0.01
0.50 - 1.00	0.05
1.00 - 1.50	0.1
1.50 - 2.00	0.1
2.00 - 2.50	0.2997
2.50 - 3.00	0.3
3.00 - 3.50	0.065
3.50 - 4.00	0.05
4.00 - 4.50	0.01
4.50 - 5.00	0.005
5.00 - 5.50	0.004
5.50 - 6.00	0.003
6.00 - 6.50	0.002
6.50 - 7.00	0.001
7.00 - 7.50	0.0001
7.50 - 8.00	0.0001

I.2.3 Entwässerungssystem

Ist das Entwässerungssystem im Tunnel unbekannt, so kann die Berechnung unter Verwendung der *a-priori* Verteilung, die in Abb. I.13 gegeben ist, durchgeführt werden.

Abb. I.13 A-priori Verteilungen für das Entwässerungssystem.

Entwässerungssystem	A-priori Verteilung
Keine Entwässerung	0.01
Schlitzrinnen	0.69
Einlaufschächte	0.30

I.2.4 Abstand Einlaufschächte

Die *a-priori* Verteilung für den Abstand der Einlaufschächte in Tunneln ist in Abb. I.14 gegeben. Da keine Statistik über die Abstände der Einlaufschächte vorhanden ist, basiert die *a-priori* Verteilung auf Expertenschätzungen.

Abb. I.14 A-priori Verteilungen für den Abstand der Einlaufschächte.

Abstand Einlaufschächte [m]	A-priori Verteilung
20	0.003
25	0.003
30	0.004
35	0.01
40	0.01
50	0.01

Abb. I.14 A-priori Verteilungen für den Abstand der Einlaufschächte.

Abstand Einlaufschächte [m]	A-priori Verteilung
60	0.1
70	0.7
80	0.1
90	0.05
100	0.01

I.2.5 Öffnungsgrösse der Schlitzrinne

Die *a-priori* Verteilung für die Öffnungsgrösse der Schlitzrinne in Tunneln ist in Abb. I.15 gegeben. Da keine Statistik über die Öffnungsgrösse der Schlitzrinnen vorhanden ist, basiert die *a-priori* Verteilung auf Expertenschätzungen

Abb. I.15 A-priori Verteilungen für die Öffnungsgrösse der Schlitzrinne.

Öffnungsgrösse Schlitzrinne [cm]	A-priori Verteilung
3	0.01
4	0.01
5	0.01
6	0.01
7	0.02
8	0.04
9	0.1
10	0.65
12	0.11
14	0.02
16	0.02

II Das Grenzkostenprinzip

Eine explizite Diskussion darüber, wieviel in die Sicherheit, d.h. zur Rettung von Menschenleben, investiert werden soll, wird häufig – nicht zuletzt aus ethischen Gründen – nicht geführt. Ein Grund für die ethischen Bedenken ist die Terminologie, die in Bezug auf dieses Thema von Wissenschaftlern verwendet wird. Die Terminologie „Wert eines statistischen Lebens“ suggeriert häufig, dass der Wert eines Menschenlebens bzw. eines statistischen Lebens ermittelt wird. Die ethische Frage, ob ein monetärer Wert eines Menschenlebens existiert und ob dieser ermittelt werden kann, stellt sich im Zusammenhang mit Investitionen in Personensicherheit nicht.

Es soll zunächst die Hypothese aufgestellt werden, dass der Wert eines Menschenlebens unendlich ist. Das bedeutet, dass jeder noch so kleine Zeitabschnitt im Menschenleben ebenfalls einen unendlichen monetären Wert hat. Die inkrementelle Verlängerung des Lebens würde den Einsatz aller Ressourcen rechtfertigen.

Der Wert, den eine (gesunde) Person für sein eigenes Leben ausgeben würde, würde – abgesehen von Budgetbeschränkungen – in Übereinstimmung mit dem biologischen Selbsterhaltungstrieb theoretisch nicht beschränkt sein. Der Tod führt dazu, dass der eigene Wohlstand keinen Wert mehr darstellt. Die auf den eigenen Tod bedingte Zahlungsbereitschaft würde – rationales Handeln vorausgesetzt – dazu führen, dass alle zur Verfügung stehenden Ressourcen investiert werden müssten. Dieser Effekt wird auch als *Dead-Anyway-Effect* beschrieben [85]. Dies stützt die oben aufgestellte Hypothese. Sie gilt jedoch nur, wenn der Standpunkt des Individuums eingenommen wird. Betrachtet man zwei Individuen, deren Leben inkrementell verlängert werden könnte, so führt diese Betrachtung zu Problemen in der Allokation der Ressourcen. Bei zwei Individuen kann das Entscheidungskriterium nur so gewählt werden, dass die Ressourcen so verteilt werden, dass die Summe an gewonnener Lebenszeit (unabhängig vom Individuum) maximal wird.

Diese Aussage betrifft nicht Investitionen in die Rettung einer bestimmten Person, die von einem Unglück betroffen ist. Die Präferenz der Gesellschaft, Hilfe zu leisten, ist sehr hoch und ist folgerichtig in den Gesetzen als Randbedingung festgeschrieben. Die Nicht-Rettung stellt in sehr vielen Ländern einen Straftatbestand dar und zeigt, dass die Gesellschaft dem Schutz des einzelnen Lebens einen sehr hohen Stellenwert einräumt.

Die eigentliche Frage, die das Ingenieurwesen betrifft, lautet: Wie können die zur Verfügung stehenden Ressourcen so eingesetzt und alloziert werden, dass die maximale Sicherheit für alle erreicht wird. Werden Ressourcen falsch eingesetzt, so bedeutet dies, dass sie an anderer Stelle für Massnahmen fehlen, die effizienter wären. Die Nichtbeachtung dieses Umstandes sollte in den Fokus der ethischen Diskussion der Entscheidungsträger rücken.

Die Allokation der Ressourcen im Staat zur Erfüllung seiner Aufgaben kann vereinfacht als hierarchisches Modell gesehen werden. Auf der höchsten Ebene entscheidet der Staat über die Verteilung der Ressourcen zwischen den Departementen (bzw. Ministerien), die wiederum die Verteilung auf verschiedene Sektoren übernehmen und rechtfertigen. Die Anzahl der Ebenen in dieser Hierarchie kann je nach Verantwortungsbereich variieren. Die Hierarchie ist jedoch nur auf die Organisation und nicht auf ein Machtgefüge bezogen, da der Staat allgemein ein polyzentrischer Akteur ist, der aus verschiedenen Entscheidungsträgern besteht, die mitunter verschiedene Präferenzen vertreten. Das ermöglicht auch die (politische) Einflussnahme jeder hierarchischen Stufe auf die globale Verteilung des Budgets.

Jede hierarchische Stufe hat zu entscheiden, wie die zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal, d.h. in diesem Zusammenhang kosteneffizient verteilt werden, um die Aufgaben zu bewältigen und die Ziele zu erreichen.

Was bedeutet aber in diesem Zusammenhang effizient? Jede zur Verfügung stehende Handlungsalternative geht mit der Bindung von Ressourcen einher. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Personensicherheit und der Bindung von Ressourcen oder anders gesagt, zwischen dem Volkseinkommen, das für Investitionen zur Verfügung steht, und der Lebenserwartung. Jede Investition in die Sicherheit verursacht eine Verringerung des zur Verfügung stehenden Einkommens. Es existiert somit eine Substitutionsbeziehung zwischen Lebenszeit und Einkommen. Prinzipiell können alle Optionen als akzeptierbar bezeichnet werden, bei denen das Verhältnis zwischen der Änderung der Lebenserwartung Δl und der damit verbundenen Änderung des Einkommens Δg grösser sind als die Grenzrate der Substitution MRS (Abb. 6.1):

$$\Delta l / \Delta g \geq MRS \quad (II.1)$$

Die Grenzrate der Substitution entspricht der marginalen Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft für Investitionen in die Verlängerung der Lebenszeit und damit der Personensicherheit. Aus Gleichung (II.1) kann direkt abgeleitet werden, ob es sich lohnt, den Tausch zwischen Lebenszeit und Einkommen durchzuführen. Wird die Ungleichung (II.1) eine Gleichung, so ist der Zustand der Indifferenz erreicht. Der Austausch zwischen Lebenszeit und Einkommen führt zum selben Nutzen. Damit ist es möglich, so genannte Indifferenzkurven zu entwickeln, die diesen Zustand repräsentieren.

In Abb. 6.1 rechts ist eine mögliche Indifferenzkurve schematisch dargestellt. Der Grund für die konkave Form der Indifferenzkurve ist, dass es sich bei Sicherheit um ein Normales Gut handelt [86]. Die Form ergibt sich aus der gesellschaftlichen Nutzenfunktion, in die Sicherheit zu investieren (Abb. 6.1 links). Entlang der Indifferenzkurve ist der Nutzen der Gesellschaft gleich. Ein Entscheidungsträger würde jedes Tauschverhältnis akzeptieren, bei dem er auf dieser Kurve bleibt. Anhand der Indifferenzkurve können direkt die Terminologien der Begriffe *willingness to pay* (WTP) und *willingness to accept* (WTA) dargestellt werden. Die WTA entspricht dem Verhältnis zwischen einer Reduktion der Lebenserwartung und den Kompensationskosten (Reduktion des Einkommens). Im Gegensatz dazu ist die WTP das Verhältnis zwischen einer Vergrößerung der Investitionen und einer Steigerung der Lebenserwartung durch Massnahmen. Geht man davon aus, dass sich die Gesellschaft auf einem beliebigen Punkt der Indifferenzkurve befindet, so entspricht die Ableitung in diesem Punkt den Grenzkosten. Dort ist demnach auch WTP gleich der WTA.

Eine allgemeine Herleitung, wie Gleichung (II.1) auf allgemeine Projekte zu übertragen ist, ist z.B. in [84] dargestellt. In dieser Form wird sie auch im vorliegenden Dokument angewendet. Aus Abb. 6.1 ist der Zusammenhang zwischen gesellschaftlichem Nutzen und den Grenzkosten dargestellt.

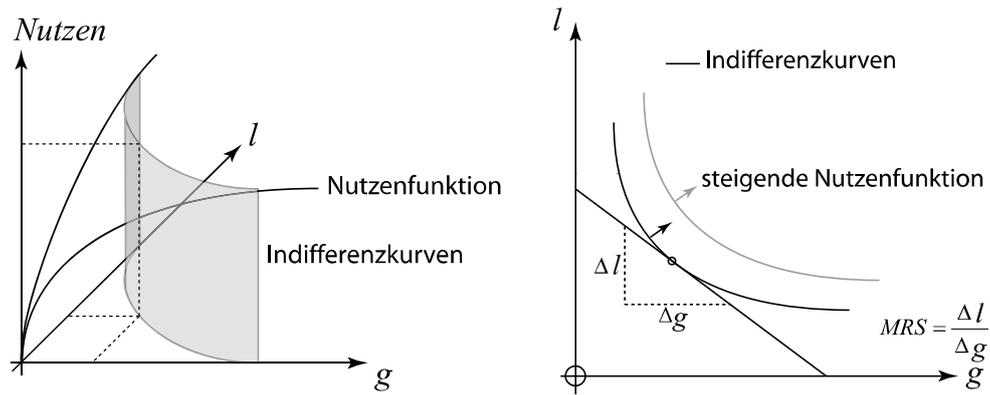


Abb. 6.1 Zusammenhang zwischen gesellschaftlichem Nutzen und den Grenzkosten.

Das Grenzkostenkriterium besagt also, dass solange in risikoreduzierende Massnahmen investiert werden sollte, bis die Kosten pro verhinderten Todesfall kleiner oder gleich den Grenzkosten sind. Damit stellt das Grenzkostenprinzip ein Akzeptanzkriterium dar, welches nicht vom absoluten Risikoniveau abhängig ist, sondern auch von Kosten, die anfallen, um das Risiko zu reduzieren.

Wie in Gleichung (II.1) zu erkennen ist, ist mathematisch gesehen die Grenzkostenfunktion die Steigung der Kostenfunktion nach der Zahl verhinderter Todesfälle.

Die jährlichen Kosten für die Massnahmen werden der Reduktion der jährlichen (monetarisierten) Risiken gegenübergestellt. Die monetarisierte Risikoreduktion in Bezug auf die Personenrisiken (hier werden nur Todesfälle berücksichtigt) berechnet sich aus:

$$\Delta R_{a,T,M_i} = \Delta F_{a,M_i} \cdot MRS \tag{II.2}$$

In Gleichung (II.2) bezeichnet MRS die Grenzkosten. Mit $\Delta F_{a,M_i}$ ist die jährliche Reduktion des Mittelwertes der Anzahl Todesfälle durch die Massnahme M_i bezeichnet. Durch die Multiplikation der beiden Zahlen ergibt sich die monetarisierte jährliche Risikoreduktion $\Delta R_{a,T,M_i}$ infolge der Massnahme M_i , wie in Gleichung (II.2) dargestellt.

III Bayes'sche Netze

III.1 Bayes'sche Netze zur Systemmodellierung

Bayes'sche Netze wurden Mitte der 1980er Jahre entwickelt mit der Motivation, den Umgang mit Informationen aus verschiedenen Quellen zu modellieren und kohärent zu interpretieren [34]. Unter Verwendung dieser Idee wurden in der Folge dann Werkzeuge zur Entscheidungsfindung in Systemen mit künstlicher Intelligenz entwickelt. Heute werden sie vielfach in Expertensystemen zur Diagnose, wie z.B. in der Medizin, aber auch im Ingenieurwesen aufgrund ihrer grossen Effizienz und Flexibilität immer häufiger verwendet. Auch in Suchfunktionen in Softwareanwendungen kommen die Netze zum Einsatz.

III.2 Bestandteile Bayes'scher Netze

Bayes'sche Netze (BN) bestehen aus gerichteten azyklischen Graphen (engl.: directed acyclic graph DAG). Der DAG enthält Knoten, die Zufallsvariablen repräsentieren. Diese Zufallsvariablen können kontinuierlichen Verteilungen folgen oder aus einem finiten Set diskreter Zustände bestehen. Zwischen den Variablen besitzt der Graph Kanten, die die Zusammenhänge zwischen den Variablen repräsentieren. Die Kanten besitzen eine Richtung, die den direkten Einfluss der einen Zufallsvariablen auf die andere ausdrückt. Die Richtung der Kanten stellt den kausalen Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen dar. Bei Modellen, die nicht unbedingt auf kausalen Abhängigkeiten basieren und mit automatisierten Techniken zur Netzerstellung arbeiten, werden die Kanten und die Richtung der Kanten über Abhängigkeiten zwischen einzelnen Zufallsvariablen bestimmt. In der technischen Risikobewertung ist es jedoch zu empfehlen, die Netzmodelle durch Experten erstellen zu lassen und die kausalen Zusammenhänge zwischen den Indikatoren zu modellieren.

Zyklische Modelle können mit Bayes'schen Netzen nicht erstellt werden. Der Einfluss eines Ergebnisses auf die Eingangsvariablen kann über die Modellierung einer zeitlichen Entwicklung berücksichtigt werden (time-slices). Dies ist in der vorliegenden Problemstellung nicht berücksichtigt worden.

Kausale Zusammenhänge sind nicht immer offensichtlich und Kausalität ist abhängig von den Handlungen und Handlungsalternativen, die zur Verfügung stehen, um die Zustände der Variablen zu verändern. In einigen Fällen muss der Experte demnach die Richtung der Kanten entsprechend der Fragestellung festlegen, da diese nicht von Anfang an eindeutig ist.

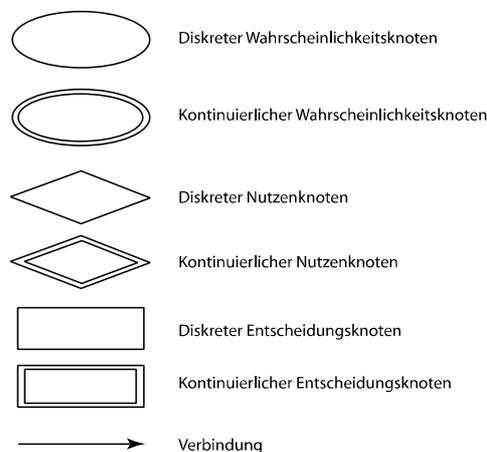


Abb. III.1 Symbole in Bayes'schen Netzen.

In Abb. III.1 sind die Symbole dargestellt, mit denen ein Bayes'sches Netz repräsentiert werden kann. Generell wird zwischen kontinuierlichen und diskreten Knoten unterschieden. In kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsknoten werden die Zufallsvariablen durch ihre (bedingte) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschrieben. Diskrete Knoten enthalten (bedingte) Wahrscheinlichkeitstabellen, in denen für die diskreten Zustände (auch „States“ genannt) der Variable die Wahrscheinlichkeiten angegeben sind. Werden in einem Netz neben den Wahrscheinlichkeitsknoten auch Nutzenknoten verwendet, so kann mit Hilfe von solchen Netzen der Erwartungswert des Risikos direkt ermittelt werden. In diesem Fall werden die Netze als Einflussdiagramme bezeichnet. Auch die Nutzenknoten können diskrete Zustände oder kontinuierliche Funktionen enthalten.

Neben der Risikoermittlung können Bayes'sche Netze auch zur Entscheidungsfindung dienen. Hierfür werden in das Netz Entscheidungsknoten eingefügt. In ihnen werden unterschiedliche Entscheidungen definiert.

In der praktischen Anwendung werden meist nur diskrete Zustände in Bayes'schen Netzen verwendet. Der Grund hierfür ist, dass in kommerzieller Software (z.B. [36]) die Verwendung kontinuierlicher Knoten bisher nur eingeschränkt möglich ist, und die Kombination von kontinuierlichen und diskreten Variablen nicht ohne weiteres möglich ist. Dies stellt allerdings keine wirkliche Einschränkung solcher Netze dar, da jede Verteilungsfunktion diskretisiert werden kann. Die Diskretisierung kann dabei an die Problemstellung angepasst werden. Bei einer geeigneten Diskretisierung der Zufallsvariablen ist die Information, die durch die Diskretisierung verloren geht, relativ gering. Eine Einschränkung bezüglich der Anzahl an Zuständen jedes Knotens besteht nicht. Ein grösserer Detaillierungsgrad wird dabei meist mit einer höheren Rechenzeit erkauft.

Die Struktur des Netzes wird unter Verwendung von Familienbeziehungen beschrieben. Geht eine Kante von einem Knoten A zu einem Knoten B , so ist der Knoten A ein Elternknoten des Kindes B . Jedes Netz besteht aus mindestens einem Elternknoten, generell aber aus:

- allen relevanten Indikatoren, die es erlauben, die Problemstellung zu beschreiben;
- bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die die Indikatoren beschreiben;
- einer Netzstruktur in Form eines azyklisch gerichteten Graphen.

III.3 Abhängigkeiten in Netzen

Netzwerke können durch ihre Konfiguration kategorisiert werden. Abb. III.2 zeigt ein serielles Netz. In diesem Netz beeinflusst der Elternknoten A den Knoten B . Dieser hat wiederum einen direkten Einfluss auf den Knoten C . Jeder Knoten enthält Informationen über den Indikator, den sie repräsentieren. Diese Informationen sind unsicher und werden durch Variablen modelliert. Die zugrunde liegende Verteilung jedes Knotens ist bedingt auf seine Elternknoten. In Abb. III.2 ist nur die Verteilung des Knotens A unbedingt. Ist ein Zustand eines Knotens mit Sicherheit bekannt, so kann diese Information in das Netz einfließen. Man spricht in diesem Fall von Evidenz. Fließt nun Evidenz in den Knoten A ein, so wird diese Information einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeiten der Knoten B und C haben. Besitzt man Evidenz über den Zustand des Knotens B , so ist der Informationsfluss zwischen den Knoten A und B unterbrochen. Die Knoten A und B sind *d-separiert*, d.h. bedingt unabhängig.

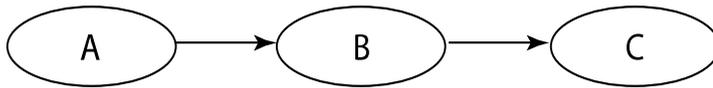


Abb. III.2 *Seriellles Bayes'sches Netz.*

In Abb. III.3 sind die Knoten *B*, *C* und *D* bedingt unabhängig, wenn Evidenz über den Knoten *A* vorliegt. Diese Konfiguration eines Netzes wird als divergierendes Netz bezeichnet.

Sind alle Elternknoten eines Knotens evident, so ist dieser in einem konvergierenden DAG bedingt unabhängig von allen anderen seiner Vorfahren, wenn keine Evidenz über irgendeinen Nachkommen des Knotens vorliegt.

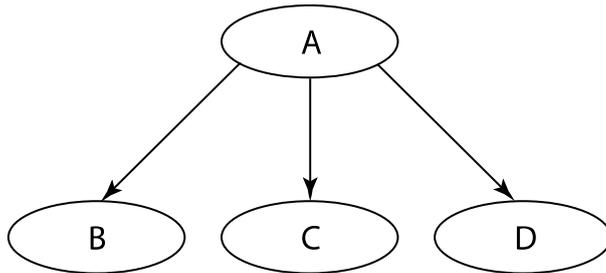


Abb. III.3 *Divergierendes Bayes'sches Netz.*

Abb. III.4 zeigt ein konvergierendes Netz. Hier sind die Knoten *B*, *C* und *D* unabhängig, solange keine Evidenz über den Knoten *A* oder die Knoten *B*, *C* und *D* vorliegt. Wird Evidenz über einen der Knoten im konvergierenden Netz eingeführt, sind alle Elternknoten *B*, *C* und *D* voneinander abhängig. Dies wird mit bedingter Abhängigkeit bezeichnet.

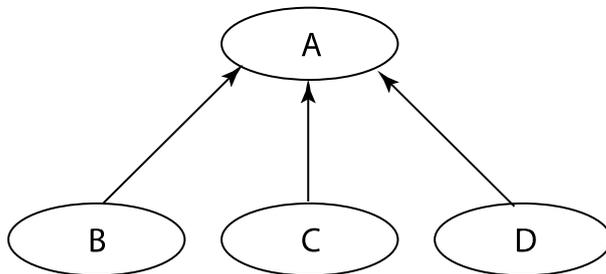


Abb. III.4 *Konvergierendes Bayes'sches Netz.*

Die Evidenz kann als harte Evidenz oder als weiche Evidenz in das Modell einfließen. Als harte Evidenz werden Informationen bezeichnet, die sicher sind, dass heisst keine inhärenten Unsicherheiten haben. Weiche Evidenz bezeichnet den Fall, in der die Information unsicher ist. Eine d-Separation in seriellen oder divergierenden Netzwerken kann nur durch harte Evidenz erreicht werden. Abhängigkeiten in konvergierenden Netzwerken entstehen durch harte und weiche Evidenz in den Netzwerken.

III.4 Wahrscheinlichkeiten und Inferenzberechnungen

Werden die Variablen in Bayes'schen Netzen durch diskrete Zustände beschrieben, können die Informationen über die Verteilungen mittels mehrdimensionaler Wahrscheinlichkeitstabellen beschrieben werden. Die Dimension $\dim(Y)$ der bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen eines Knotens *Y* kann über Gleichung (III.1) bestimmt werden:

$$\dim(Y) = 1 + \sum_{i=1}^n X_i \tag{III.1}$$

Mit X_i sind die Elternknoten des Knotens *Y* bezeichnet. Für das divergierende Netz, das

Abb. III.5 zeigt, besitzt der Knoten A nur eine Dimension, da er keine Elternknoten hat. Mit den beiden Elternknoten A und B besitzt die Wahrscheinlichkeitstafel des Knotens C drei Dimensionen. Die Anzahl an Dimensionen steigt mit der Anzahl an Elternknoten. Wahrscheinlichkeitstabellen sind eine Möglichkeit, um diese Mehrdimensionalität darzustellen.

In Abb. III.5 ist ein konvergierendes Bayes'sches Netz mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeitstabellen gezeigt. Jede Verteilungsfunktion der Variablen A, B und C ist durch zwei Zustände diskretisiert. In der Regel sind wesentlich mehr Zustände notwendig, um die Variablen sinnvoll zu repräsentieren. Da dadurch lediglich der Rechenaufwand zunimmt, wird in diesem Kapitel zur Illustration mit zwei Zuständen gerechnet.

Ein besonderer Vorteil von Bayes'schen Netzes ist, dass bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen verwendet werden. Dies erleichtert es Experten, eine *a-priori* Verteilung für die Knoten anzugeben und Modellrechnungen auf ihre Plausibilität zu prüfen, da die Einschätzung bedingt auf einen bestimmten Zustand des Systems erfolgt. Durch die bedingten Tafeln wird ein Grad an Überschaubarkeit (auch bei multidimensionalen Problemstellungen) erreicht.

Unter Verwendung der bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen kann die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller Knoten im Netz allgemein berechnet werden zu:

$$P(\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^n P(x_i | pa_i, S^h) \tag{III.2}$$

Da hier nur Fälle betrachtet werden, in denen die Struktur des Netzes bekannt ist, wird im Folgenden die Bedingung auf die Struktur des Netzes S^h vorausgesetzt. Zur Vereinfachung wird sie in der Notation nicht mitgeführt.

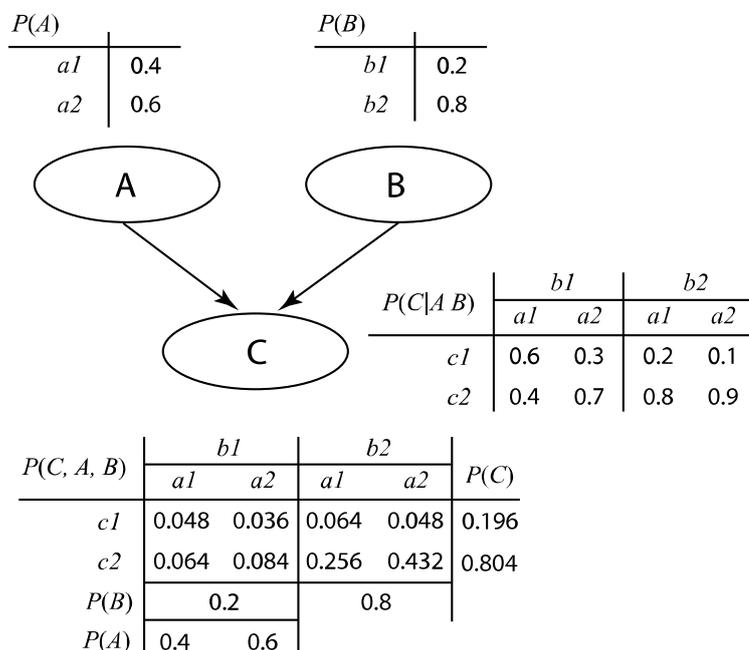


Abb. III.5 Konvergierendes Bayes'sches Netz mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeitstabellen.

In Gleichung (III.2) bezeichnet x_i die Zustände i der einzelnen Knoten x und pa_i die Elternknoten. Für die Netzstruktur in Abb. III.5 kann nach Gleichung (III.2) die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden zu:

$$P(C, A, B) = P(C | A, B)P(A)P(B) \tag{III.3}$$

Die korrespondierende Wahrscheinlichkeitstafel ist in Abb. III.5 gegeben. Aus den Wahrscheinlichkeitstafeln lassen sich die Randverteilungen der einzelnen Knoten durch Integration bzw. Summation aller anderen Variablen berechnen. Für das Beispiel in Abb. III.5 ergibt sich die Randverteilung für C zu:

$$P(C) = \sum_A \sum_B P(A, B, C) \tag{III.4}$$

Bei der Marginalisierung über mehrere Variablen spielt die Reihenfolge der Summation keine Rolle.

Die Inferenzberechnung in Bayes'schen Netzen dient der Propagation von Informationen durch das Netz. Die Inferenzberechnung nutzt dabei die Struktur, die Familienbeziehungen sowie die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen des Netzes, um mit effizienten Algorithmen diese Propagation der Information im Netz zu berechnen. Für detaillierte Betrachtungen zu effizienten Algorithmen wird auf die oben angegebene Literatur verwiesen.

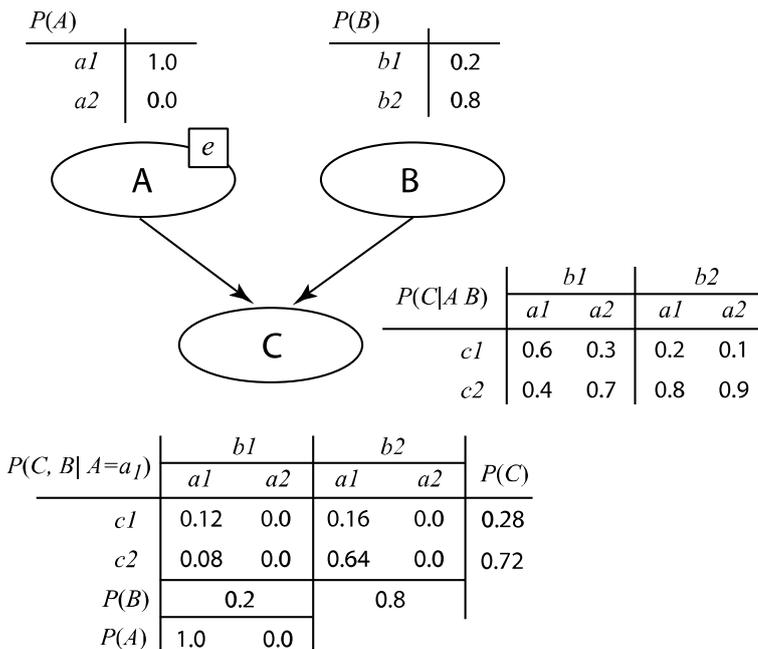


Abb. III.6 Konvergierendes Bayes'sches Netz mit Evidenz im Knoten A.

Einfache Beispiele können ohne solche Algorithmen leicht berechnet werden. Einige kurze Beispiele sollen hier dazu dienen, die Berechnungen in Bayes'schen Netzen zu zeigen. Im ersten Beispiel, das in Abb. III.6 dargestellt ist, ist der Zustand über die Variable A z.B. durch Beobachtungen sicher bekannt (harte Evidenz). Welchen Einfluss hat dies auf die anderen Variablen? Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(C, B | A = a_1)$ berechnet sich über:

$$P(\mathbf{X}_j | \boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{P(\boldsymbol{\varepsilon} | \mathbf{X}_j)P(\mathbf{X}_j)}{P(\boldsymbol{\varepsilon})} \tag{III.5}$$

In Gleichung (III.5) bezeichnet $\varepsilon = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ ein Set von Evidenz über Variablen $X(\varepsilon)$ des Netzes. Mit X_j sind alle Variablen bezeichnet, über die keine Beobachtungen vorliegen. Ziel ist es, die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser nicht beobachteten Variablen unter Berücksichtigung aller Beobachtungen zu berechnen. Das Ergebnis der Berechnungen für das Beispiel ist in der Tabelle in Abb. III.6 gegeben. Die Kenntnis über den Zustand der Variable A hat keinen Einfluss auf die Variable B .

Liegt Evidenz in einem Knoten eines konvergierenden Netzes über Knoten vor, die Eltern haben, so werden diese Elternknoten bedingt abhängig voneinander. Zur Verdeutlichung ist dieser Fall in Abb. III.6 dargestellt. Es wird harte Evidenz über den Zustand des Knotens $C = c_2$ eingeführt. Dadurch verändern sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Elternknoten nach Gleichung (III.5). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für Knoten A berechnet sich zu:

$$P(A = a_1 | C = c_2) = \frac{\sum_{i=1}^2 P(C = c_2 | A = a_1, B = b_i) P(B = b_i)}{\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 P(C = c_2 | A = a_j, B = b_i) P(B = b_i)} \tag{III.6}$$

Das Ergebnis für die Knoten kann der Abb. III.7 entnommen werden.

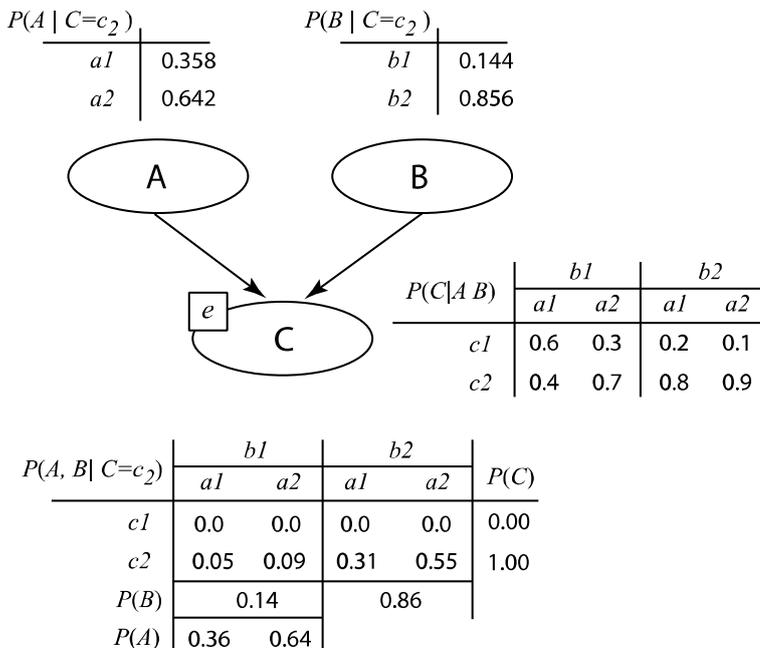


Abb. III.7 Konvergierendes Bayes'sches Netz mit Evidenz im Knoten C.

III.5 Verwendung von Datensätzen in Modellen

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die in den einzelnen Knoten vorliegen, können über probabilistische Modelle oder aus Daten berechnet werden. Bei probabilistischen Modellen werden die Eingangsgrößen der meist parametrisierten Modelle als unsichere Größen betrachtet, und so die Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen spezifischen Zustand berechnet. Modellrechnungen kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn sehr wenige Daten vorliegen, um ein Phänomen zu beschreiben, die physikalischen Zusammenhänge jedoch verstanden und modelliert werden können.

Ist eine ausreichende Anzahl an Daten vorhanden, so können die Verteilungsfunktionen direkt aus diesen Datensätzen ermittelt werden. Die Schätzung der Verteilungsfunktion aus den Daten ist wiederum unsicher. Je mehr Daten vorhanden sind, desto geringer werden die statistischen Unsicherheiten.

Sind Datensätze über verschiedene Indikatoren vorhanden, so liegen diese meist in Form einer Kontingenztabelle vor. Die Beobachtungen über die Zustände der Indikatoren, können unterschiedlichen Typs sein. Abb. III.8 zeigt eine Kontingenztabelle für verschiedene Indikatoren und deren Zustände für zwei Beobachtungen. Jeder Indikator repräsentiert einen anderen Typ einer Beobachtung. Die möglichen Zustände des Indikators X_i sind von booleschem Typ mit lediglich zwei Zuständen. Es kann Zustände von Indikatoren geben, deren Zustände durch Bezeichnungen beschrieben werden. In den meisten Fällen sind die Zustände der Indikatoren jedoch reelle, natürliche oder ganze Zahlen.

Liegen solche Daten vor, können diese direkt verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeitsverteilungen in einem Bayes'schen Netz zu aktualisieren. Auf das Aktualisieren der Netze wird im nächsten Kapitel näher eingegangen. Bei Kontingenztabelle, wie bei allen Datensätzen, kann es vorkommen, dass einige Daten fehlen. In Abb. III.8 ist dies für die zweite Beobachtung des Indikators X_2 der Fall (N/A engl.: not available). Wie im nächsten Kapitel gezeigt wird, können unter Verwendung geeigneter Algorithmen die in inkompletten Datensätzen enthaltene Information verwendet werden.

Abb. III.8 Kontingenztabelle für verschiedene Indikatoren.

	Indikatoren				
	X_1	X_2	X_3	X_i	X_n
1. Beobachtung	Boolesch	Label	\mathbb{R}	\mathbb{N}	\mathbb{Z}
2. Beobachtung	Boolesch	N/A			
i. Beobachtung					
n. Beobachtung					

III.6 Aktualisierung unter Verwendung von Datensätzen

Vorhandene Datensätze können in Bayes'schen Netzen direkt genutzt werden, um die Verteilungsfunktionen der Indikatoren zu bestimmen oder zu aktualisieren. Dazu können die Daten aus den Kontingenztabelle direkt in das Bayes'sche Netz einfließen. Die Möglichkeit des Lernens macht Bayes'sche Netze besonders interessant. Dieses Lernen erfolgt über die Aktualisierung mit neuen Daten, sobald diese verfügbar sind und kann überall dort eingesetzt werden, wo Daten gesammelt werden. Im Strassenwesen können z.B. aktuelle Beobachtungen über die Verkehrsmenge und Verkehrsverteilung verwendet werden, um Modelle zur Beschreibung der Unfallgefahr zu aktualisieren.

Allgemein ist von Interesse, wie sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung ändert, wenn die Beobachtungen berücksichtigt werden. Im einfachsten Fall soll davon ausgegangen werden, dass die *a-priori* Verteilung nichtinformativ ist. Welche Verteilung als nichtinformativ *a-priori* Verteilung gewählt werden sollte, wird in [87] diskutiert. Die *a-posteriori* Verteilung kann dann über den Maximum Likelihood Schätzer direkt ermittelt werden. Der MLM-Schätzer $\hat{P}(X_2 = x | X_1 = y)$ der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass $X_2 = x$ ist, gegeben, dass $X_1 = y$ ist, kann angegeben werden zu:

$$\widehat{P}(X_2 = x | X_1 = y) = \frac{\widehat{P}(X_2 = x, X_1 = y)}{\widehat{P}(X_1 = y)} = \frac{\frac{n(X_2 = x, X_1 = y)}{N}}{\frac{n(X_1 = y)}{N}} = \frac{n(X_2 = x, X_1 = y)}{n(X_1 = y)} \quad (III.7)$$

Hierin bezeichnet $n(X_2 = x, X_1 = y)$ die Anzahl der Beobachtungen aus dem Datensatz, in denen der Indikator X_2 den Wert x angenommen hat und X_1 gleichzeitig den Wert y hat. Der Divisor der Gleichung (III.7) entspricht der gesamten Anzahl an Beobachtungen, in denen der Indikator X_1 den Wert y angenommen hat. Allgemein kann Gleichung (III.7) formuliert werden, indem alle möglichen Elternknoten berücksichtigt werden:

$$\theta = \widehat{P}(X_i | pa_i) = \frac{n(X_i, pa_i)}{n(pa_i)} \quad (III.8)$$

θ in Gleichung (III.8) kann als Vektor der Parameter der Verteilung verstanden werden.

Die Aktualisierung soll an einem einfachen Beispiel illustriert werden. Dazu soll das Netz in der Abb. III.9 betrachtet werden. Die Abhängigkeiten der Indikatoren im Netz sind festgelegt. Über die Verteilungsfunktionen der Indikatoren ist *a-priori* jedoch nichts bekannt. Dieser Zustand soll durch eine Gleichverteilung beschrieben werden, d.h. jeder Zustand der Indikatoren ist gleichwahrscheinlich. Diese *a-priori* Verteilungen der Indikatoren sind mit $P(\cdot)$ bezeichnet. Des Weiteren liegt ein Set von neun Beobachtungen der Indikatoren A und B vor, die in der Kontingenztabelle zusammengefasst sind (siehe Abb. III.9). Die Verteilungsfunktionen der Indikatoren können unter Verwendung der Beobachtungen nach Gleichung (III.7) aktualisiert werden. Der Zustand a_1 des Indikators A wurde fünfmal beobachtet.

Dementsprechend ist die aktualisierte Wahrscheinlichkeit $P''(A = a_1) = 5/9 = 0.556$. Die so berechnete *a-posteriori* Wahrscheinlichkeitsverteilung wird mit $P''(\cdot)$ bezeichnet. Die Ergebnisse für alle anderen Zustände sind in Abb. III.9 zusammengestellt.

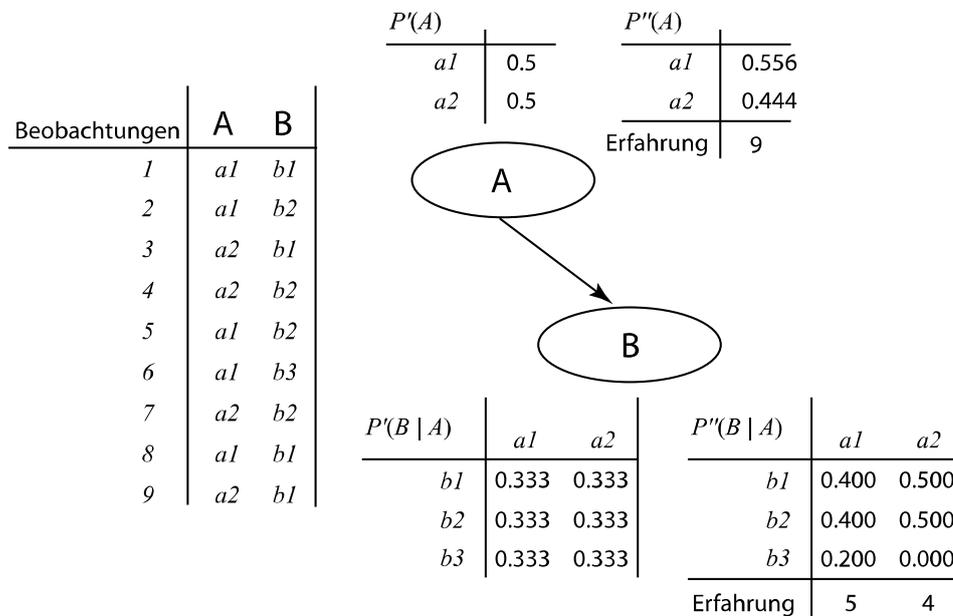


Abb. III.9 Aktualisierung Bayes'scher Netze unter Verwendung von Beobachtungen.

In der bedingten Wahrscheinlichkeitstabelle des Indikators B tritt eine Zelle mit dem Wert Null auf. Dieser Zustand ist in den Daten nicht beobachtet worden. Es sollte beachtet werden, dass für praktische Anwendungen dieser Fall vermieden werden sollte, da Nullzellen auch durch weitere Daten nicht mehr aktualisiert werden können. Ist die *a-priori* Wahrscheinlichkeit gleich Null, so existiert dieser Zustand nicht und kann demnach auch nicht aktualisiert werden. In praktischen Anwendungen bietet es sich an, Nullzellen durch Addition einer inkrementell kleinen Wahrscheinlichkeit zu vermeiden. Es sollte auch bedacht werden, dass bei sehr grossen Netzen die Anzahl von Beobachtungen sehr gross sein muss, um jede Kombination der Zustände der Indikatoren beobachten zu können.

Im Bayes'schen Netz wird auch die Erfahrung angegeben und entspricht der Anzahl an Beobachtungen. Werden neue Beobachtungen gemacht, dann kann das Netz mit dem neuen Set an Daten aktualisiert werden. Die bestehende Erfahrung gewichtet dann den Einfluss, den „älteres“ Wissen hat.

Werden die Erfahrungen einer älteren Stichprobe genau mit der Anzahl der Beobachtungen gewichtet, so sind die neue und die alte Information gleichwertig.

In Fällen, in denen die neue Information mehr wert ist als die bereits Bestehenden, können ältere Informationen auch geringer gewichtet werden. Dies wird auch als äquivalente Stichprobengrösse (*equivalent sample size*) bezeichnet. Dadurch wird auch ermöglicht, Expertenwissen in das Modell einfliessen zu lassen. Im Beispiel in Abb. III.9 wurde von einer nicht-informativen *a-priori* Verteilung ausgegangen, d.h. es wurden Gleichverteilungen für die Indikatoren gewählt. Da keine Erfahrung vorlag, ist auch die Erfahrung gleich Null. Kann ein Experte die Verteilung des Indikators einschätzen, kann dieses Wissen als *a-priori* Verteilung genutzt werden. Unter Verwendung der Erfahrung kann er seine Einschätzung zusätzlich gewichten. Einen hohen Wert bei der Erfahrung deutet darauf hin, dass sich der Experte in seiner Einschätzung sicher ist. Das der *degree of belief* eines Experten in das Netz einfliessen kann, ist ein wesentlicher Vorteil. Durch das Einbeziehen dieses Expertenwissens kann Gleichung (III.9) erweitert werden zu (Dirichlet Prior):

$$\theta = \frac{\alpha(X_i | pa_i) + n(X_i | pa_i)}{\alpha(pa_i) + n(pa_i)} \tag{III.9}$$

Der zusätzliche Term $\alpha(X_i | pa_i)$ berücksichtigt die äquivalente Stichprobengrösse κ der *a-priori* Verteilungsfunktion für den Zustand des Elternknotens pa_i und berechnet sich zu:

$$\alpha(X_i | pa_i) = \kappa P'(X_i | pa_i) \tag{III.10}$$

Auch wenn die Wahrscheinlichkeitstabellen unter Verwendung von Modellen berechnet wurden, so können diese unter Verwendung von Beobachtungen aktualisiert werden. In diesen Fällen muss der Experte auch die Güte des Modells bewerten. Je höher die Gültigkeit des Modells beurteilt wird, desto weniger Einfluss haben die Daten. Der Ausdruck *Gültigkeit* bezieht sich hier nur auf die Information in den Indikatoren. Sollen Modelle aktualisiert werden, so ist das Modell immer mit einem äquivalenten Stichprobenumfang zu bewerten. Andernfalls bleibt die Information, die das Modell geliefert hat, nicht im Netz erhalten. Ein Beispiel für eine so gewichtete *a-priori* Verteilung ist in Abb. III.10 gegeben. Die *a-priori* Verteilung ist nicht gleichverteilt. Diese Information ist durch einen äquivalenten Stichprobenumfang nach Gleichung (III.10) gewichtet. Der zum Aktualisieren verwendete Datensatz entspricht dem Beispiel in Abb. III.10. Die *a-posteriori* Wahrscheinlichkeit für den Zustand a_i der Variable A berechnet sich zu:

$$P''(A = a_1 | pa_i) = \frac{\alpha(A = a_1 | pa_i) + n(A = a_1 | pa_i)}{\alpha(pa_i) + n(pa_i)} = \frac{4 \cdot 0.8 + 5}{4 + 9} = 0.631 \quad (III.11)$$

Es kommt nicht selten vor, dass Datensätze unvollständig sind. Dies kann verschiedene Gründe haben. Es kann vorkommen, dass die Daten unter unterschiedlichen Bedingungen ermittelt wurden und dadurch in einem Datensatz mehr Daten erhoben wurden als in einem anderen. Oft sind Zustände auch einfach nicht bekannt oder es wurde vergessen, sie aufzunehmen. Dabei sollte unterschieden werden, ob die Daten zufällig oder aus einem bestimmten Grund nicht aufgenommen wurden. Liegt so ein Grund vor, und ist dieser abhängig vom Zustand des Indikators, so ist diese fehlende Information anders zu behandeln, als wenn sie zufällig vergessen wurde [88]. Der erste Fall beinhaltet auch eine Information, die berücksichtigt werden kann. Dies ist jedoch ein Spezialfall, auf den hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Sind fehlende Daten im Datensatz zufällig, so können diese Daten mit probabilistischen Verfahren approximiert werden. Die gängigsten Methoden sind die *Markov-Chain-Monte-Carlo-Method*, die auch als *Gibbs-Sampling* bekannt ist [89], [90], und der *Expectation-Maximization (EM)* Algorithmus [91], [92]. Da der *EM*-Algorithmus in vielen kommerziellen Software-Paketen verwendet wird und effizient und einfach ist, soll er hier kurz vorgestellt werden. Die Anwendung im Bayes'schen Netz für diskrete Zustände wird anhand eines Beispiels gezeigt.

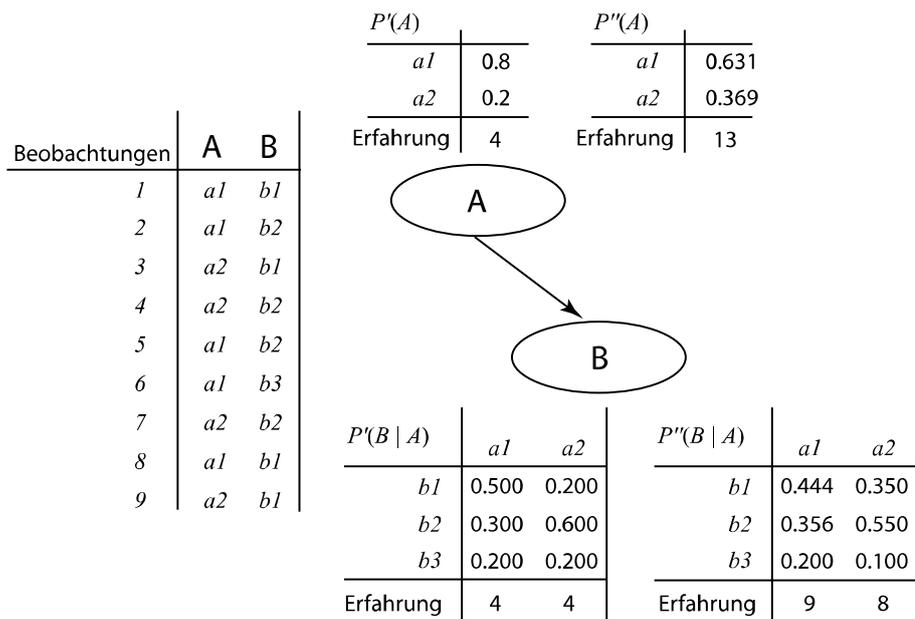


Abb. III.10 Aktualisierung Bayes'scher Netze unter Verwendung von Beobachtungen und Expertenmeinungen.

Der *EM*-Algorithmus besteht aus zwei Stufen:

- der Erwartungswertbildung einer Realisation (E-Schritt);
- der Maximierung des Likelihood (M-Schritt).

In Bayes'schen Netzwerken dient der E-Schritt dazu, den Erwartungswert der Realisationen der nicht beobachteten Zustände der Variable zu berechnen. Die Anzahl der nicht beobachteten Zustände bei gegebenem Zustand der Elternknoten pa_i soll hier mit $u(pa_i)$ bezeichnet werden. Jede der nicht beobachteten Realisationen könnte jeden der Zustände der Variable angenommen haben.

Daher wird zunächst unter Verwendung der *a-priori* Verteilung die Wahrscheinlichkeit jedes Zustandes berechnet. Dazu können die oben genannten Methoden zur Inferenzberechnung verwendet werden. Der Erwartungswert der Beobachtungen für jeden Zustand der Variable ergibt sich zu:

$$E[n(X_i | pa_i)] = n(X_i | pa_i) + u(pa_i) P'(X_i | pa_i) \tag{III.12}$$

Mit diesem Erwartungswert wird der Maximum-Likelihood berechnet unter Verwendung von Gleichung (III.8). Dies entspricht dem M-Schritt im EM-Algorithmus. Dieser Schätzer wird im nächsten Iterationsschritt als *a-priori* Verteilung verwendet und der Erwartungswert der Beobachtungen neu berechnet. Die Iteration wird solange durchgeführt, bis ein Konvergenzkriterium erreicht wird. Im Allgemeinen wird festgelegt, dass Konvergenz erreicht ist, wenn die Differenz zwischen zwei Iterationsschritten des Logarithmus des Likelihood kleiner als ein festgelegter Grenzwert δ ist:

$$l(\theta_i) - l(\theta_{i+1}) \leq \delta \tag{III.13}$$

Hierin bezeichnet i den Iterationsschritt.

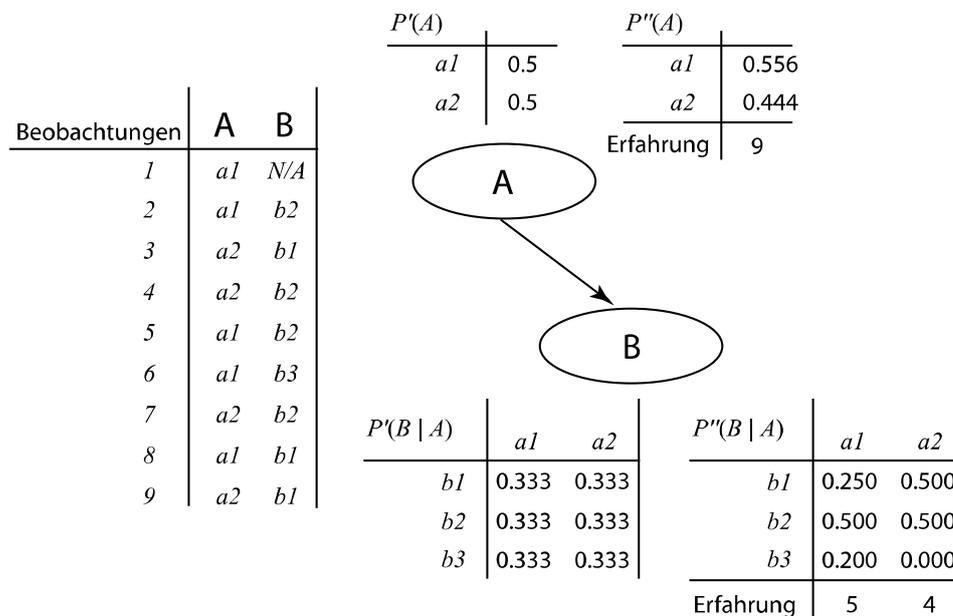


Abb. III.11 Aktualisierung Bayes'scher Netze unter Verwendung von Beobachtungen mit fehlenden Daten.

Das Beispiel in Abb. III.11 soll das Vorgehen veranschaulichen. Das Bayes'sche Netz ist, wie in den Beispielen zuvor, bereits modelliert. Es wurde eine nicht-informative *a-priori* Wahrscheinlichkeitsverteilung der einzelnen Indikatoren gewählt. Nun soll das Netz unter Verwendung der neun Beobachtungen aktualisiert werden. Für den Indikator A ist das Set an Beobachtungen vollständig.

Für den Indikator B ist das Datenset unvollständig, die erste Beobachtung wurde nicht dokumentiert. Dies ist in der Tabelle durch die Bezeichnung *N/A* gekennzeichnet. Im ersten Schritt wird der Erwartungswert des fehlenden Wertes unter Verwendung der *a-priori* Verteilung ermittelt und zu den Beobachtungen addiert und mit diesem Erwartungswert unter Verwendung von Gleichung (III.8) der Maximum-Likelihood berechnet. Die einzelnen Iterationsschritte sind in Abb. III.12 zusammengestellt. Das Konvergenzkriterium mit $\delta = 0.001$ ist nach fünf Iterationen erreicht.

Abb. III.12 Iterationsschritte für den EM-Algorithmus für das Beispiel in Abb. III.11.

	Iterationen				
	1	2	3	4	5
$E [n (B = b_1 A = a_i)]$	1.333	1.267	1.253	1.251	1.250
$E [n (B = b_2 A = a_i)]$	2.333	2.467	2.493	2.499	2.500
$E [n (B = b_3 A = a_i)]$	1.333	1.267	1.253	1.251	1.250
$P'' (B = b_1 A = a_i)$	0.267	0.253	0.251	0.250	0.250
$P'' (B = b_2 A = a_i)$	0.467	0.493	0.499	0.500	0.500
$P'' (B = b_3 A = a_i)$	0.267	0.253	0.251	0.250	0.250
l	-5.303	-5.221	-5.203	-5.200	-5.199
δ	-	0.082	0.018	0.004	0.001

Für den Fall, dass die *a-priori* Wahrscheinlichkeit bereits aus Daten ermittelt wurde, oder die *a-priori* Wahrscheinlichkeit über einen Experten geschätzt wurde, wird in der Iteration für die Berechnung des Maximum-Likelihood die Gleichung (III.11) verwendet. Dadurch kann die äquivalente Stichprobengrösse auch beim Aktualisieren von Netzen mit inkompletten Datensätzen berücksichtigt werden.

Ein Nachteil des *EM*-Algorithmus ist, dass er immer gegen ein lokales Maximum des Likelihood konvergiert. Daher sollte bei multimodalen Verteilungen darauf geachtet werden, dass für unterschiedliche Startwerte im Algorithmus (d.h. unterschiedlichen *a-priori* Verteilungen) auch unterschiedliche *a-posteriori* Verteilungen resultieren können.

Ein Vorteil des Algorithmus ist, dass der Likelihood durch Jensens Ungleichheitsgesetz bei jedem Iterationsschritt steigt [93]. In den ersten Iterationsschritten steigt der Likelihood relativ stark. Der Algorithmus konvergiert in den ersten Iterationsschritten schneller als andere Algorithmen und ist effizient, wenn das Konvergenzkriterium d nicht zu klein gewählt wird.

Aus den Daten kann neben den bedingten Wahrscheinlichkeiten auch die Netzstruktur gelernt werden [94]. Dieses *structural learning* ergibt vielfach Sinn bei Anwendungen, in denen die Einflussindikatoren und die kausalen Zusammenhänge nicht von vornherein bekannt sind. Im Ingenieurwesen ist dieses eher selten und wird hier daher nicht weiter erläutert.

Glossar

Begriff	Bedeutung
Akzeptiertes Risiko	Höhe des Risikos, welches von einem Risikoeigner oder von einer Gemeinschaft hingenommen wird und nicht (weiter) durch Massnahmen reduziert wird.
Annuitätenmethode	Verfahren um die Summe der Barwerte aller durch eine Investition verursachten Zahlungen auf die Nutzungsdauer so zu verteilen, dass die Zahlungsfolge aus Einzahlungen und Auszahlungen in eine Jährlichkeit umgewandelt wird.
Barwertmethode	Verfahren, um zukünftige Zahlungen durch Abzinsung und summieren auf einen Entscheidungszeitpunkt zu beziehen.
Basisbrandereignisrate	Mittlere Brandraten, die sich aus der gesamten Population der vorhandenen Daten berechnet.
Basisgefahrutraten	Mittlere Ereignisraten von Gefahrgutunfällen, die sich aus der gesamten Population der vorhandenen Daten berechnet.
Basisunfallrate	Mittlere Unfallrate, die sich aus der gesamten Population der vorhandenen Daten berechnet.
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosions
BPN	Bayesian Probabilistic Network; Bayes'sches Netz
Effizienz	Verhältnis zwischen einem definierten Nutzen und dem Aufwand, der zu dessen Erreichung notwendig ist.
Eintretenswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit, für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses in einem bestimmten Zeitraum in der Zukunft. Begebenheit, welche zu einer Veränderung des Zustandes eines Systems führen kann. Ein Ereignis kann plötzlich auftreten oder sich langsam einstellen.
Ereignis	Begebenheit, welche zu einer Veränderung des Zustandes eines Systems führen kann. Ein Ereignis kann plötzlich auftreten oder sich langsam einstellen.
Exposition	Allgemein: Prozesse, Zustände und Rahmenbedingungen, die das Potential haben, Ereignisse; hier als Fahrzeugkilometer pro Jahr definiert
Gefahr	Potentielle Quelle eines Risikos, die zu einem plötzlich eintretenden Schadenereignis führen kann.
GV	Gegenverkehr
Hintergrundrate	Mittelwert der Ereignisrate über alle Tunnel im Verantwortungsbereich des ASTRA im Strassennetz.
Indikatorvariable	Zufallsvariable, die zur Beschreibung des Risikos verwendet wird.
Konsequenzen	Durch ein Ereignis verursachter Nutzen oder Schaden.
Kosteneffizient	Verhältnis zwischen den (jährlichen) Kosten einer risikoreduzierenden Massnahme und der (jährlichen) monetarisierten Risikoreduktion durch die Massnahme.
Methode	Konkretes Vorgehen, Handlungsanweisung, Algorithmus
Methodik	Verfahrensweise, wissenschaftlicher Weg zu einem Ziel
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
Regeln der Technik	Regeln, die in der Wissenschaft als theoretisch richtig erkannt, in der Praxis angewendet werden und sich bewährt haben.
Risiko	Produkt aus Eintretenswahrscheinlichkeit und (negativer) Konsequenz.
RV	Richtungsverkehr
SSVZ	Schweizerische Strassenverkehrszählung
Tolerierbares Risiko	Das Risiko, welches die Gesellschaft nach Ermittlung, Bewertung und Behandlung zu tragen bereit ist, um definierte Ziele zu erreichen.
Übergeordnete Risikobewertung	Betrachtet einen grösseren geografischen und/oder technischen Untersuchungsparameter als diejenige der hier beschriebenen Risikobewertung der Tunnel.
Verletzbarkeit	Schadensempfindlichkeit eines Systemen gegenüber Ereignissen.

Literaturverzeichnis

Bundesgesetze

- [1] Schweizerische Eidgenossenschaft (1960), „**Bundesgesetz vom 8. März 1960 über die Nationalstrassen (NSG)**“, SR 725.11, www.admin.ch.
- [2] Schweizerische Eidgenossenschaft (1958), „**Strassenverkehrsgesetz vom 19. Dezember 1958 (SVG)**“, SR 741.01, www.admin.ch.

Verordnungen

- [3] Schweizerische Eidgenossenschaft (1991), „**Verordnung vom 27. Februar 1991 über den Schutz vor Störfällen, Störfallverordnung, StfV**“, SR 814.012, www.admin.ch.
- [4] Schweizerische Eidgenossenschaft (2007), „**Nationalstrassenverordnung (NSV) vom 7. November 2007**“, SR 725.111, www.admin.ch.
- [5] Schweizerische Eidgenossenschaft (1979), „**Signalisationsverordnung vom 5. September 1979 (SSV)**“, SR 741.21, www.admin.ch.
- [6] Schweizerische Eidgenossenschaft (2002), „**Verordnung über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse**“, SR 741.621, www.admin.ch.

Weisungen

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

Richtlinien des ASTRA

- [8] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Sicherheitsmassnahmen gemäss Störfallverordnung bei Nationalstrassen**“, ASTRA Richtlinie 19001, www.astra.admin.ch
- [9] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Umsetzung der Störfallverordnung auf den Nationalstrassen**“, ASTRA Richtlinie 19002, www.astra.admin.ch
- [10] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Lüftung der Strassentunnel**“, ASTRA Richtlinie 13 001, www.astra.admin.ch
- [11] Bundesamt für Strassen ASTRA (2008), „**Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln**“, ASTRA Richtlinie 13 002, www.astra.admin.ch
- [12] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen**“, ASTRA Richtlinie 19004, www.astra.admin.ch
- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012) „**Videoanlagen**“, ASTRA Richtlinie 13 005, www.astra.admin.ch
- [14] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln**“, ASTRA Richtlinie 13 010, www.astra.admin.ch

Normen

- [15] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel - Grundlagen**“, Norm SIA 197.
- [16] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2004), „**Projektierung Tunnel - Strassentunnel**“, Norm SIA 197/2.
- [17] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (2001), „**Ganglinientypen und durchschnittlicher täglicher Verkehr**“, VSS, SN 640 005a
- [18] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (2001), „**Kreuzungsfreie Knoten**“ VSS, SN 640 261
- [19] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (1998), „**Geschwindigkeit als Projektierungselement**“ VSS, SN 640 080b,
- [20] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (2012), „**Beleuchtung in Strassentunneln, -galerien und -unterführungen**“, SN 640 551-1

Fachhandbücher des ASTRA

- [21] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Fachhandbücher T/U - K- BSA - T/G, V2.00**“, Abteilung Strasseninfrastruktur I

Dokumentationen des ASTRA

- [22] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Risikokzept für Tunnel der Nationalstrassen - Methodik zur Ermittlung und Bewertung der Risiken in Tunneln**“, ASTRA Dokumentation 89 005, www.astra.admin.ch
- [23] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen - Anwendungsbeispiel**“, ASTRA Dokumentation 89 007, www.astra.admin.ch
- [24] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Gefahrguttransporte in Strassentunneln**“, ASTRA Dokumentation 84 002, www.astra.admin.ch
- [25] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Umsetzung der Störfallverordnung auf den Nationalstrassen**“, ASTRA Dokumentation 89 006, www.astra.admin.ch
- [26] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Structure des documents techniques de l'OFROU**“, ASTRA Dokumentation 8A001, www.astra.admin.ch
- [27] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), „**Risikokzept Naturgefahren Nationalstrassen**“, ASTRA Dokumentation 89 001, www.astra.admin.ch

Berichte und weitere Grundlagen

- [28] M. H. Faber, J. Köhler, M. Schubert, E. Sabiote, C. Fermaud, D. Imhof und A. Scheiwiller, (2009), „**Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung**“ ASTRA Bericht 618, Bern
- [29] PIARC (2008), „**Analyse des Risques pour les Tunnels Routiers / Risk Analysis for Road Tunnels**“ ISBN 2-84060-202-4 und PIARC Technical Committee C.4 Working group 2: Road Tunnel Safety. Technical Report: „Risk Evaluation“
- [30] PIARC (1999), „**05.05.B Fire and Smoke Control in Road Tunnels**“ Committee on Road Tunnels C5, Brüssel, Belgien
- [31] SafeT (2004), „**First Deliverable to EU Harmonised risk assessment Version**“.
- [32] N. P. Hoj und B. van den Horn (2010), „**Risk Assessment – a state of the art approach to deal with Safety in Underground Facilities. Benchmarking of Selected Risk Analysis Methods**“ in *ITA-COSUF Workshop 8*, Frankfurt, Deutschland
- [33] M. Schubert, N. P. Hoj, J. Köhler und M. H. Faber (2011), „**Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels**“ ASTRA Bericht 1351, Bern
- [34] J. Pearl (1985), „**Bayesian networks: A model of self-activated memory for evidential reasoning**“ University of California, Irvine, USA
- [35] Hugin (2010), „**Hugin Researcher**“, Aalborg: Hugin Experts AS, Denmark.
- [36] GeNie&Smile (2013), „**Graphical Network Interface**“, Pittsburg, USA: Decision Systems Laboratory, <http://dsl.sis.pitt.edu>
- [37] AgenaRisk (2010), „**Bayesian Networks**“, Cambridge CB23 7NU, UK
- [38] European Parliament (2004), „**Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network**“ European Parliament, Brüssel, Belgien
- [39] C. Fermaud, M. Sieber, C. Willi, C. Zulauf, M. H. Faber, M. Schubert, J. Köhler und E. Sabiote (2009), „**Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten, Ermittlung des Netzrisikos**“ ASTRA, Bericht 619, Bern
- [40] R. Rackwitz (2002), „**Optimization and risk acceptability based on the Life Quality Index**“ *Structural Safety*, pp. 297-331.
- [41] Bundesamt für Strassen ASTRA (2011), „**Workshops zur Erstellung eine Methodik für die Risikoanalysen von Tunneln der Nationalstrasse**“, Bern, 2011/2012.
- [42] F. Amundsen und G. Ranes (1997), „**Traffikkulykker i vegtunneler**“ Vegdirektoratet, Oslo Norwegen
- [43] F. Amundsen und A. Engebretsen (2009), „**Traffic accidents in road tunnels. An analysis of traffic accidents on national roads for the period of 2001-2006**“ Vegdirektoratet, TS Report, Oslo, Norwegen.
- [44] F. Amundsen und P. Melvaer (1997), „**Data om tunneler pa riks- og fylkesveger 1996/1997**“ Vegdirektoratet, TS Report, Oslo, Norwegen.
- [45] Bundesamt für Statistik (1992), „**Strassenverkehrsunfälle - Instruktionen, Erhebungsunterlagen**“, Bern
- [46] INERIS (2005), „**Transport of Dangerous goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model**“ (v. 3.60 and v. 3.61), Research Report No 20504, User's Guide, Reference Manual

- [47] C. Nussbaumer und G. Nossek (2010), „**Sicherheit von Straßentunnels, Verkehrssicherheit in Tunnels auf Autobahnen und Schnellstraßen (1999-2009)**“ Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien, Österreich
- [48] Bundesamt für Statistik (2011), „**Strassenverkehrsunfälle und verunfallte Personen**“ [Online]. <http://www.bfs.admin.ch>. [Zugriff am 07 März 2012].
- [49] M. Deublein, M. Schubert, B. Adey, J. Köhler und M. H. Faber (2013), „**Prediction of Road Accidents: A Bayesian Hierarchical Approach**“ *Accident Analysis and Prevention*, Bd. 51, pp. 274-291
- [50] U. Salvvisberg, R. Allenbach, M. Cavegn, M. Hubacher und S. Siegrist (2004), „**Verkehrssicherheit in Autobahn- und Strassentunneln des Nationalstrassennetzes**“ Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, BfU, Bern
- [51] Bundesamt für Strassen ASTRA (2000), „**Tunnel Task Force Schlussbericht**“ Bern
- [52] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Einfluss der Tunnellüftung auf das Personenrisiko in Strassentunneln**, Fachbericht erstellt im Auftrag des ASTRA, Interner Bericht.
- [53] L. Pinkowski (2005), „**Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage**“ FB 6: Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität Braunschweig, PhD, Braunschweig, Deutschland
- [54] OECD (1997), „**Road Safety Principles and Models: Revue of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models**“ Paris, Frankreich
- [55] OECD (2001), „**Safety in tunnels transport of dangerous goods through road tunnels**“ Paris, Frankreich, 2001.
- [56] G. Nilsson (2004), „**Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety**“ Department of Technology and Society, Lund University, PhD: 121., Lund, Norwegen.
- [57] U. Ewert (2008), „**Faktenblatt Geschwindigkeit des bfu Nr. 2.037.01**“ Beratungsstelle für Unfallverhütung,
- [58] R. Elvik, P. Christensen und A. Amundsen (2004), „**Speed and road accidents. An evaluation of the Power Model**“ Institute of Transport Economics, 740/2004 , Oslo, Norwegen
- [59] H. Lindenmann und R. Zuberbühler (1993), „**Geschwindigkeiten auf verschiedenen Strassentypen**“ Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH Zürich, Zürich,
- [60] A. Erath und P. Fröhlich (2004), „**Die Geschwindigkeiten im PW-Verkehr und die Leistungsfähigkeiten von Strassen über den Zeitraum 1950-2000**“ Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung. Zürich, IVT, ETH Zürich183:103, Zürich
- [61] N. P. Hoj und M. H. Faber (2008), „**Risikoanalyse av tunnelsystemet pa E39 Gartnerlokka - Hannevikdalen i Kristiansand Risikoanalyse ved anvendelse av Bayeske Net**“ NPRA Region Süd, Oslo
- [62] E. Hauer (2001), „**Road Grade and Safety**“, Review of Literature for the Interactive Highway Design Model, Toronto, Canada
- [63] S. P. Miaou (1995), „**Development of adjustment factors for single vehicle run-off-the-road accident rates by horizontal**“, Tennessee, USA: Oak Ridge National Laboratory
- [64] S. Lingelser (1998), „**Pannes, accidents, et incendies dans les tunnels routiers francais**“, France Centre d'Etudes des Tunnels CETU, Bron Cedex, France, 1998.
- [65] C. Hidber und M. Lendi (1999), „**Konfliktanalyse: Gotthard-Strassentunnel 2. Röhre: Schlussbericht**“, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau IVT, Zürich
- [66] D. Weger, M. Kruiskamp und J. Hoeksma (2001), „**Road Tunnel Risk Assessment in the Netherlands**“ *European Safety & Reliability Conference ESREL - Towards a Safer World*, Torino, Italien
- [67] T. Vrouwenvelder, M. Lovegrove, M. Holicky, P. Tanner und G. Canisius (2001), „**Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering**“ *Safety, Risk and Reliability - Trends in Engineering, IABSE*, Malta
- [68] C. Aizlewood und G. Webber (1995), „**Escape route lighting: Comparison of human performance with traditional lightning and wayfinding systems**“, *Lighting Research and Technology*, Bd. 27, Nr. 3, pp. 133-143
- [69] FGSV (2005), „**HBS Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen**“ Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln, Deutschland
- [70] D. Helbing (1997), „**Verkehrsdynamik neue physikalische Modellierungskonzepte**“ Berlin, Deutschland: Springer
- [71] Vejdirektoratet, Copenhagen (2009), „**Trafikuheld Året 2008, Dato 11.09.09, Rev. 3.11.09.**“ Dok Nr. 07/06920-3
- [72] Femern Bælt A/S (2010), „**Fehmarnbelt Fixed Link - Bridge Design, Hazard Report: Road Accidents, (HAZ 2), Ver. 0.1**“ WORK IN PROGRESS (Nicht öffentliches Dokument) COWI Obermeyer, Copenhagen,

-
- [73] UPTUN (2006), „**Major European RTD-Project on cost effective, sustainable and innovative upgrading methods for fire safety in existing tunnels**“
-
- [74] C. Zulauf, P. Locher, B. Steinauer, G. Mayer, U. Zimmermann, W. Baltzer, W. Riepe und P. Kündig (2007), „**Bewertung der Sicherheit von Strassentunneln**“, Berlin: Bundesminister für Verkehr
-
- [75] W. Joseph S. Pliskin (1980), „**Utility Functions for Life Years and Health Status**“ *Operations Research*, Bd. 28, Nr. 1, pp. 206-224,
-
- [76] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Medienmitteilung vom 29.03.2012: Erneut weniger Verkehrstopfer auf Schweizer Strassen**“, Bern
-
- [77] H. Sommer, O. Brügger, C. Lieb und S. Niemann (2007), „**Volkswirtschaftliche Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz, Strassenverkehr, Sport, Haus und Freizeit**“, Bern: Bfu - Beratungsstelle für Unfallverhütung, Report 58
-
- [78] J. C. Cuaresma, E. Gnan und D. Ritzenberger-Grünwald (2005), „**Der natürliche Zinssatz - Begriffsbestimmung und Analyse für den Euroraum**“ *Geldpolitik und Wirtschaft* 4, pp. 31-51.
-
- [79] HSE (1974), „**Health and Safety at Work etc Act 1974**“ UK Legislation (Health and Safety) / UK Parliament, London, UK
-
- [80] Bundesamt für Statistik (2010), „**Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2010-2060**“ Bern
-
- [81] PLANAT (2009), „**Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden. Strategie**“, Bern
-
- [82] E. Blaeij (2003), „**The value of statistical life in road safety: a meta-analysis**“ *Accident Analysis & Prevention*, Bd. 35, pp. 973-986.
-
- [83] Joint Committee on Structural Safety (2008), „**Principles, System Representation & Risk Criteria**“ Joint Committee on Structural Safety, Zürich
-
- [84] M. Schubert (2009), „**Konzepte zur informierten Entscheidungsfindung im Bauwesen**“, Zürich: ETH Zürich,
-
- [85] J. Pratt (1996), „**Willingness to Pay and the Distribution of Risk and Wealth**“ *The Journal of Political Economy*, Bd. 104, pp. 747-763
-
- [86] W. K. Viscusi (1978) „**Labor Market Valuations of Life and Limb: Empirical Evidence and Policy Implications**“ *Public Policy*, Bd. 26, p. 359–386
-
- [87] G. Box und G. Tiao (1992), „**Bayesian inference in statistical analysis**“, New York, USA: John Wiley.
-
- [88] D. Heckman (1995), „**A Tutorial on Learning with Bayesian Networks**“ Redmond, USA: Microsoft Research, Advanced Technology Division: 57
-
- [89] S. Geman und D. Geman (1984), „**Stochastic Relaxation, Gibbs Distributions and the Bayesian Restoration of Images**“ *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Bd. 6, Nr. 6, pp. 721-741
-
- [90] J. Clark (2006), „**Hierarchical modelling for environmental sciences statistical methods and applications**“, Oxford, UK: Oxford University Press
-
- [91] A. Dempster, N. Laird und D. Rubin (1977), „**Maximum Likelihood from Incomplete Data via EM Algorithm**“ *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, Bd. 39, Nr. 1, pp. 1-38
-
- [92] S. Lauritzen (1995), „**The EM Algorithm for Graphical Association Models with Missing Data**“ *Computational Statistics & Data Analysis*, Bd. 19, Nr. 2, pp. 191-201
-
- [93] K. Lange (1999), „**Numerical analysis for statisticians**“, New York: Springer, 1999.
-
- [94] N. Friedman (1998), „**The Bayesian Structural EM Algorithm**“ *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI '98)*, Morgan Kaufmann
-

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2014	1.10	15.02.2019	Anpassung der Grenzkosten.
2014	1.00	13.10.2014	Publikation der deutschen Version.

