

Anhänge

Inhaltsverzeichnis

Anhang 1	Normative Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln	1
A 1.1	Einleitung	1
A 1.2	Übersicht der ausgewerteten Grundlagen	3
A 1.3	Ergebnisse	4
A 1.4	Schlussfolgerungen	7
Anhang 2	Ansätze der Sicherheitsbewertung	9
Anhang 3	Rechnergestützten Methoden für Sicherheitsbewertungen	24
A 3.1	Einleitung	24
A 3.2	Grafische Erstellung von Fehlerbäumen	25
A 3.3	Grafische Erstellung von Ereignisbäumen	26
A 3.4	Berechnungsmodelle und ihre Parameter	26
A 3.5	Zusatzfunktionen	26
A 3.6	Fazit	26
A 3.7	Kosten	27
A 3.8	Detaillierte Beschreibung der Funktionen der für die QRA konzipierten Programme	27
Anhang 4	Ereignisszenarien	38
Anhang 5	Ereignisbäume	46
Anhang 6	Methodik der Unfallanalyse	50
A 6.1	Einleitung	50
A 6.2	Konzeption der Datenbasis	50
A 6.3	Methodik der Unfallanalyse	54
A 6.3.1	Grundlagen	54
A 6.3.2	Analyse des Unfallgeschehens für jeden Tunnel bzw. jede Tunnelröhre	58
A 6.3.3	Analyse des Unfallgeschehens bezüglich relevanter Parameter	60
A 6.3.4	Berechnung von Unfallhäufigkeiten als Initialereignis	61
A 6.3.5	Verwendung von Literaturergebnissen vorangegangener Studien	62
A 6.3.6	Verwendete Zahlenschlüssel, Tafeln, Diagramme	63
Anhang 7	Ergebnisse der Unfallanalyse	73
Anhang 8	Risikobewertung	89
Anhang 9	Richtkosten für Maßnahmen	100
Anhang 10	Fallbeispiele	102
A 10.1	Einleitung	102
A 10.2	Tunnel A	102
A 10.3	Tunnel B	103
A 10.4	Tunnel C	109
A 10.5	Tunnel D	113
A 10.6	Tunnel E	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick Methoden/Modelle zur Sicherheitsbewertung für Straßentunnel nach [20]	20
Abbildung 2: Prinzip des Sicherheitsnachweises	22
Abbildung 3: Struktur Ereignisbaum Kollision, Schadenindikator Todesopfer	46
Abbildung 4: Struktur Ereignisbaum Kollision, Schadenindikator Sachschäden und Verletzte	47
Abbildung 5: Struktur Ereignisbaum Brand, Schadenindikator Todesopfer	48
Abbildung 6: Struktur Ereignisbaum Brand, Schadenindikator Sachschäden und Verletzte	49
Abbildung 7: Struktureller Aufbau der Datenbank	51
Abbildung 8: Beispiel der Dateneingabe für einen Tunnel	53
Abbildung 9: Eingabemaske für Unfälle	54
Abbildung 10: Beispiel der ersten Seite einer Verkehrsunfallanzeige	56
Abbildung 11: Unfalltyp 1: Fahr Unfall (F)	66
Abbildung 12: Unfalltyp 3: Einbiege/Kreuzen (EK)	67
Abbildung 13: Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr (LV)	68
Abbildung 14: Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall (SO)	69
Abbildung 15: Unfallauswertung für Tunnelröhrenrichtung – Beispiel Engelbergtunnel FR Rottweil	81
Abbildung 16: Unfälle pro Tunnelfahrt in Abhängigkeit der Längsenklasse für Richtungsverkehrstunnel (Einzelpunkte ohne Gewichtung der Betriebsdauer jeder Röhre)	82
Abbildung 17: Unfälle pro Tunnelfahrt in Abhängigkeit der Längsenklasse für Gegenverkehrstunnel (ohne Gewichtung der Betriebsdauer jeder Röhre)	83
Abbildung 18: Anteil der Unfalltypen am Unfallgeschehen in Abhängigkeit der Tunnelmerkmale	84
Abbildung 19: Eingangswerte für die Risikoberechnung – Verzweigungspunkt Unfalltypenverteilung in Abhängigkeit der Tunnelmerkmale	86
Abbildung 20: Kostensätze für Sachschäden und Verletzte nach ESAS (Preisstand 2000)	86
Abbildung 21: Schadenhöhe aller betrachteten Unfälle nach Verkehrsart und Unfalltyp	87
Abbildung 22: Verteilung der Schadenhöhe nach Verkehrsart und Unfalltyp als Eingangswert für die Risikoberechnung	88
Abbildung 23: Beispiel unterschiedlicher Risikokategorien	90
Abbildung 24: Einteilung der Risiken in Risikokategorien	92
Abbildung 25: Signalwirkung eines großen Unfalls	94
Abbildung 26: Beispiele von Aversionsfunktionen	95
Abbildung 27: Risikominderung und Kosten für zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen	96
Abbildung 28: Grenzkosten und optimale Maßnahmen	97
Abbildung 29: Beispiele von Grenzkosten nach Risikokategorie im Verkehrsbereich	99
Abbildung 30: Modell zur Brandsimulation mittels FDS für den Tunnel B	104

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Abbildung 31. Darstellung der simulierten Rauchfront bei einem 5 MW-Brand (mit Lüftung)	105
Abbildung 32: Darstellung der simulierten Rauchfront bei einem 30 MW-Brand (mit Lüftung)	105
Abbildung 33: Darstellung der Sichtweiten bei einem 30 MW-Brand (mit Lüftung)	106
Abbildung 34: Ergebnisse Rauchgasausbreitung eines 5 MW-Brandes mittels "RAST"	107
Abbildung 35: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel B	108
Abbildung 36: Schadenausmaßermittlung für einen 30 MW-Brand, Situation fließender Verkehr, mit Lüftung	110
Abbildung 37: Schadenausmaßermittlung für einen 30 MW-Brand, Situation fließender Verkehr, ohne Lüftung	111
Abbildung 38: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel C	112
Abbildung 39: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 5 MW-Brand mittels "RAST" (mit Lüftung)	114
Abbildung 40: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 30 MW-Brand mittels "RAST" (mit Lüftung)	115
Abbildung 41: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel D	116
Abbildung 42: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 50 MW-Brand (ohne Lüftung)	118
Abbildung 43: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel E	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Forderung nach Risikoanalysen gemäß EG-Richtlinie [1]	3
Tabelle 2:	Auswertete normative Grundlagen	4
Tabelle 3:	Methodikbausteine für eine Sicherheitsbewertung	18
Tabelle 4:	Methodische Anforderungen der EG-Richtlinie und der RABT 2003	22
Tabelle 5:	Datenstruktur eines Tunnels bezüglich der Veränderlichkeit	51
Tabelle 6:	Übersicht der Untersuchungsparameter für jede Tunnelröhre	59
Tabelle 7:	Mögliche Unterscheidung von vergleichbaren Tunneltypen für die Unfalluntersuchung	60
Tabelle 8:	Zahlenschlüssel für Unfalltypen, Unfallarten, Unfallkategorien	64
Tabelle 9:	Zahlenschlüssel für Fahrzeuge	65
Tabelle 10:	Zahlenschlüssel für Unfallursachen	71
Tabelle 11:	Richtwerte für Kosten baulicher, betrieblicher und technischer Maßnahmen	101
Tabelle 12:	Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel B	103
Tabelle 13:	Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel C	109
Tabelle 14:	Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel D	113
Tabelle 15:	Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel E	117

Anhang 1 Normative Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln

A 1.1 Einleitung

Im Nachgang zu den Brandereignissen in den Straßentunneln Mont Blanc (F/I) und Tauern (A) wurden in zahlreichen europäischen Staaten sowie auf übergeordneter internationaler Ebene erhebliche Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit in Straßentunneln unternommen. Insbesondere im Bereich der normativen Vorgaben (Normen und Richtlinien) wurden aufgrund der Erkenntnisse aus den beiden Unfallereignissen zahlreiche Anpassungen und Neuerungen vorgenommen.

Neben verschiedenen Forschungsprojekten wurde 2004 auf europäischer Ebene eine neue Richtlinie über die Mindestanforderungen an die Sicherheit in Straßentunneln des transeuropäischen Straßennetzes verabschiedet. In der EG-Richtlinie wie auch in der RABT 2006 werden neu neben den Forderungen nach klar definierten technischen und baulichen Maßnahmen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen (so genannter maßnahmenorientierter Ansatz), auch Forderungen bzw. die Möglichkeit des Einsatzes von Sicherheitsmaßnahmen genannt, welche aufgrund der für einen Tunnel spezifischen Risikosituation vorzusehen sind (so genannter risikoorientierter Ansatz).¹ Methodische Anforderungen zur Umsetzung der risikoorientierten Betrachtung werden aber nur punktuell gemacht.

In der Vergangenheit wurden im Zusammenhang mit den Anforderungen an Sicherheitsmaßnahmen in Straßentunneln vorwiegend maßnahmenorientierte Ansätze herangezogen; risikoorientierte Betrachtungen wurden nur in Einzelfällen vorgenommen. Die nachfolgende Übersicht fasst zusammen, ob bzw. inwieweit risikoorientierte Ansätze in den heute vorliegenden Normen und Richtlinien Eingang gefunden haben. Ferner wird untersucht, ob sich in den normativen Grundlagen etwaige Anhaltspunkte zu den heranzuziehenden methodischen Aspekten finden.

Eine Gegenüberstellung und Auswertung verschiedener nationaler Normen und Richtlinien wurde bereits im Rahmen der Arbeiten des thematischen Netzwerks "Fire in Tunnels (FIT)" erarbeitet. Für weitergehende Informationen zum Vergleich der jeweiligen Maßnahmenforderungen in den nationalen normativen Vorgaben wird auf die entsprechende Dokumentation verwiesen [3]. Für die Zwecke der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Auswertungen auf etwaige risikoorientierte Ansätze in den Normen und Richtlinien fokussiert.

Die nachfolgende Zusammenstellung zeigt die aus Blickwinkel der risikoorientierten Ansätze wichtigsten Forderungen der EG-Richtlinie 2004/54/EG [1], welche zwei Arten von Risikoanalysen unterscheidet:

- Risikoanalysen gemäß Artikel 13
- Nicht näher spezifizierte Risikoanalysen

¹ Weitergehende Informationen zur Unterscheidung dieser beiden Ansätze finden sich in Anhang 2.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

- Die nachfolgende Übersicht zeigt, in welchen Fällen die EG-Richtlinie welche Risikoanalyse fordert:

	Risikoanalyse gemäß Artikel 13	Nicht näher spezifizierte Risikoanalyse
Art. 3 Abschnitt (2)	<i>Wenn bestimmte, in Anhang I festgelegte bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können, die nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten verwirklicht werden können, kann die Verwaltungsbehörde im Sinne des Artikels 4 die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu diesen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Alternativmaßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird anhand einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 nachgewiesen. Die Mitgliedstaaten teilen der Kommission unter Angabe von Gründen mit, welche risikomindernden Alternativmaßnahmen sie akzeptieren. Tunnel, die sich in der Planungsphase gemäß Artikel 9 befinden, sind von den Bestimmungen dieses Absatzes ausgenommen.</i>	
Anhang I Abschnitt 1.1.3	<i>Weist ein Tunnel hinsichtlich der genannten Parameter eine besondere Charakteristik auf, ist eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 durchzuführen, um festzustellen, ob zur Sicherstellung eines hohen Sicherheitsniveaus im Tunnel zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind. Bei dieser Risikoanalyse sind die beim Betrieb des Tunnels möglicherweise auftretenden Unfälle, die für die Sicherheit der Tunnelnutzer eindeutig von Belang sind, sowie Art und Umfang ihrer möglichen Folgen zu berücksichtigen.</i>	
Anhang I Abschnitt 1.2.1	<i>...risikomindernde Alternativmaßnahmen, die zum Einsatz kommen oder verstärkt werden, um ein mindestens gleichwertiges Sicherheitsniveau sicherzustellen, einschließlich des Nachweises hierfür in Form einer Analyse der relevanten Risiken.</i>	
Anhang I Abschnitt 2.2.3		<i>In Tunneln mit einem Gefälle über 3 % sind ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.</i>
Anhang I Abschnitt 2.2.4		<i>Beträgt die Breite der Spur für langsam fahrende Fahrzeuge weniger als 3,5 m und ist Schwerverkehr zugelassen, so sind ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.</i>
Anhang I Abschnitt 2.3.5		<i>Notausgänge sind dann vorzusehen, wenn eine Analyse der betreffenden Risiken einschließlich der Rauchbildungs- und -ausbreitungsgeschwindigkeit unter örtlichen Gegebenheiten zeigt, dass die Lüftung und andere Sicherheitsvorkehrungen nicht ausreichen, um die Sicherheit der Straßennutzer sicherzustellen.</i>
Anhang I Abschnitt		<i>Entwässerung: Können diese Anforderungen in einem bestehenden Tunnel nicht oder nur</i>

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

	Risikoanalyse gemäß Artikel 13	Nicht näher spezifizierte Risikoanalyse
2.6.2		<i>zu unverhältnismäßig hohen Kosten erfüllt werden, so ist dies ausgehend von einer Analyse der relevanten Risiken bei der Entscheidung über die Genehmigung des Gefahrguttransports zu berücksichtigen.</i>
Anhang I Abschnitt 2.9.3	<i>Lüftung: In Tunneln mit Gegenverkehr und/oder stockendem Richtungsverkehr dürfen Längslüftungssysteme nur verwendet werden, wenn eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 zeigt, dass dies annehmbar ist und/oder spezielle Maßnahmen, beispielsweise angemessene Verkehrssteuerung, kürzere Abstände zwischen den Notausgängen, Rauchabsaugung in regelmäßigen Abständen, getroffen werden.</i>	
Anhang I Abschnitt 3.4	<i>Die bei einem Störfall in einem Tunnel bis zum Eintreffen der Einsatzdienste benötigte Zeit muss so kurz wie möglich sein; sie ist bei periodisch abzuhaltenden Übungen zu messen. Sie kann außerdem während eines Störfalls gemessen werden. Bei größeren Gegenverkehrstunneln mit hohem Verkehrsaufkommen ist im Rahmen einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 zu ermitteln, ob die Stationierung von Einsatzdiensten an den beiden Tunnelportalen erforderlich ist.</i>	
Anhang I Abschnitt 3.7	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Vor der Festlegung oder Änderung von Vorschriften und Anforderungen für den Gefahrguttransport durch einen Tunnel ist eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 durchzuführen.</i> • <i>Im Einzelfall sind im Anschluss an die genannte Risikoanalyse spezielle betriebliche Maßnahmen zur Verringerung der Risiken für bestimmte oder alle Gefahrgutfahrzeuge in Tunneln zu prüfen, z. B. Meldung vor der Einfahrt oder Durchfahrt in Konvois mit Begleitfahrzeugen.</i> 	
Anhang I Abschnitt 3.8		<i>Aufgrund einer Risikoanalyse ist zu entscheiden, ob Schwerverkehr in Tunneln mit mehr als einem Fahrstreifen in jeder Richtung das Überholen erlaubt werden sollte.</i>
Anhang II Abschnitt 2.3	<i>...eine Verkehrsprognose unter Darlegung und Begründung der erwarteten Bedingungen für die Beförderung von Gefahrgut, zusammen mit der Risikoanalyse gemäß Anhang I Abschnitt 3.7</i>	

Tabelle 1: Forderung nach Risikoanalysen gemäß EG-Richtlinie [1]**A 1.2 Übersicht der ausgewerteten Grundlagen**

Folgende normative Grundlagen wurden ausgewertet:

Land	Titel
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2003) [2]
Frankreich	<ul style="list-style-type: none"> • Circulaire interministérielle n°2000-63 [4] • Circulaire interministérielle n°2000-82 [5]

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Land	Titel
	<ul style="list-style-type: none"> • Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, fascicule 4 [6]
Großbritannien	<ul style="list-style-type: none"> • BD 78/99 Design of Road Tunnels [7]
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> • RVS 9.234, Projektierungsrichtlinien, Innenausbau [8] • RVS 9.261 Projektierungsrichtlinien, Lüftungsanlagen, Grundlagen [9] • RVS 9.281 Projektierungsrichtlinien, Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Bauliche Anlagen [10] • RVS 9.282 Projektierungsrichtlinien, Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung [11]
Schweiz	<ul style="list-style-type: none"> • SIA 197 Projektierung Tunnel – Grundlagen [12] • SIA 197/2 Projektierung Tunnel – Straßentunnel [13] • ASTRA, Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in den Tunnels [14] • ASTRA, Lüftung der Straßentunnel [15]
USA	<ul style="list-style-type: none"> • NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and other limited Access Highways [28]

Tabelle 2: Auswertete normative Grundlagen

Neben den in Tabelle 2 ausgewerteten normativen Grundlagen wurden noch weitere Dokumente im Hinblick auf methodische Aspekte bei der Sicherheitsbewertung von Straßentunneln ausgewertet bzw. entsprechende Abklärungen getroffen.

A 1.3 Ergebnisse

Nachfolgend sind die im Kontext zum Forschungsprojekte maßgeblichen Aspekte der ausgewerteten normativen Grundlagen zusammengefasst.

Deutschland

Seit 2003 ist eine überarbeitete Fassung der RABT [2] in Kraft getreten. Die darin genannten Vorgaben hinsichtlich der in Straßentunneln zu treffenden Sicherheitsmaßnahmen basieren vorwiegend auf dem aktuellen Stand der Technik, also einem maßnahmenorientierten Ansatz. Bei der Dimensionierung bzw. Festlegung der Anforderungen an die Ausgestaltung zahlreicher Sicherheitsmaßnahmen werden jedoch risikorelevante Einflussgrößen wie etwa das Verkehrsaufkommen oder die Länge des Tunnels berücksichtigt und Anforderungen an die zu treffenden Maßnahmen hängen somit von solchen risikoorientierten Einflussgrößen ab.

Risikoorientierte Betrachtungen werden bei der Auslegung der Lüftungsanlagen für Straßentunnel genannt, wenn eine Bemessungsbrandleistung von 100 MW erforderlich ist und die Realisierung einer entsprechenden Lüftungsanlage aus bau- oder anlagentechnischen Gründen nicht

möglich erscheint. Für diese Fälle wird gemäß RABT 2003 eine Kosten-Risiko-Abwägung gefordert. Ferner wird eine Risikobewertung für den Gefahrguttransport unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Ausrüstung und dem Vorhandensein möglicher Alternativrouten gefordert. Hinsichtlich der methodischen Grundlagen wird hierzu auf die Untersuchungen der OECD/PIARC [16] und die Schweizerische Störfallverordnung [17] verwiesen. Weitergehende methodische Anforderungen werden nicht festgelegt.

Frankreich

Die im Runderlass Nr. 2000-63 [4] aufgeführten normativen Vorgaben zur Ausstattung und zum Betrieb von Straßentunneln sind weitgehend maßnahmenorientiert und sind somit unabhängig von der jeweiligen spezifischen Risikosituationen für den jeweiligen Straßentunnel vorzusehen.

Für den Umgang mit Gefahrguttransporten in Straßentunneln wird im Runderlass Nr. 2000-82 [5] auf die Vorschläge zur harmonisierten Gruppierung der Gefahrgüter der OECD/PIARC-Studie [16] verwiesen und damit implizit auch ein risikoorientierter Ansatz berücksichtigt. Allerdings beschränken sich die Empfehlungen auf eine Berücksichtigung der Einteilung der Gefahrgutgruppen gemäß [16] für etwaige Transportbeschränkungen oder anderweitige Sicherheitsmaßnahmen für Gefahrguttransporte. Weitergehende Forderungen nach der Durchführung einer Sicherheitsbewertung werden in [5] nicht genannt.

Für alle Tunnel des französischen Straßennetzes mit einer Länge über 300 m sind künftig so genannte Sicherheitsberichte (Dossier des sécurité) zuhanden der verantwortlichen Behörden zu erstellen. In Teil 4 des "Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers" [6], in welchem die Anforderungen an das Sicherheitsdossier festgehalten sind, werden die in [4] genannte Forderung nach der Ausarbeitung einer tunnelspezifischen, pragmatischen Gefahrenübersicht konkretisiert. Dazu finden sich spezifische Szenarien sowie Grundlagen zu Ereignishäufigkeiten und zur Abschätzung der Schadenausmaße. Welche konkreten Anforderungen aus den Erkenntnissen aus dem Sicherheitsbericht in die Maßnahmenplanung einfließen, kann nicht abschließend beurteilt werden.²

Großbritannien

Die Richtlinie BD78/99 [7] gibt Vorgaben für die vorzusehenden Sicherheitsmaßnahmen sowie für Betrieb und Unterhalt von neuen bzw. instand gestellten Straßentunneln in Großbritannien fest. In der Richtlinie werden die Tunnel für die Maßnahmenplanung aufgrund ihrer Länge und ihres Verkehrsaufkommens in fünf Kategorien eingeteilt. Im Wesentlichen werden in der Richtlinie die Anforderungen für eine Vielzahl der Vorgaben hinsichtlich Minimalausstattung aufgrund dieser Einteilung bzw. weiterer risikorelevanter Einflussgrößen (z. B. zulässige Höchstgeschwindigkeit, Längsneigung etc.) vorgeben.

² Zum Zeitpunkt der Bearbeitung lagen noch nicht alle Grundlagen vor oder waren nur in Entwurfsform verfügbar.

Im Rahmen von so genannten Voruntersuchungen (Planungsphase bzw. vor Sanierung) wird u.a. eine Risikoabschätzung gefordert, anhand derer die maßgeblichen Risiken ermittelt und der entsprechende Handlungsbedarf hinsichtlich Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden soll. Als Hilfestellung gibt die Richtlinie dazu zu untersuchende Szenarien sowie pragmatische Vorgaben zur Risikoabschätzung und zu den zugehörigen Risikobewertungskriterien vor.

Österreich

Die baulichen Anforderungen nach [10] an die Ausgestaltung von Straßentunneln in Österreich basieren weitgehend auf maßnahmenorientierten Ansätzen.

Die Festlegung der tunnelspezifischen technischen Ausrüstung, insbesondere der Tunnellüftung gemäß [9], erfolgt hingegen anhand einer Einteilung der Tunnel nach vier so genannten Gefährdungsklassen. Anhand einer einfachen Formel ist für jeden Tunnel das Gefährdungspotenzial basierend auf den risikorelevanten Einflussgrößen Verkehrsaufkommen, Verkehrsführung (Kreuzungen, Verflechtungen) sowie dem Aufkommen an Gefahrguttransporten zu ermitteln. Basierend auf dem ermittelten Gefährdungspotenzial kann der Tunnel einer von vier Gefährdungsklassen zugeordnet werden und so der erforderliche Maßnahmenstandard abgeleitet werden.

Schweiz

Die bauliche Ausgestaltung geplanter Straßentunnel in der Schweiz wird in den Normen [12] und [13] geregelt. In beiden Normen finden sich nur vereinzelte risikoorientierte Anforderungen an die Ausgestaltung des Tunnels bzw. der baulichen Sicherheitseinrichtungen. Ebenso sind die Anforderungen an die Ausgestaltung und die Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in neuen und bestehenden Tunneln fast ausnahmslos maßnahmenorientiert.

Eine Ausnahme stellt die Wahl und Dimensionierung des vorzusehenden Lüftungssystems in neuen und bestehenden Tunneln gemäß [15] dar. Hier werden anhand einer Abschätzung der maßgeblichen Tunnelcharakteristika, welche die Risiken eines Tunnelbrandes beeinflussen wie beispielsweise Verkehrsaufkommen, Gefälle oder Stauhäufigkeit, die Anforderungen an das vorzusehende Tunnellüftungssystem ermittelt.

Transporte von Gefahrgut werden in der Schweiz mit der so genannten Störfallverordnung [17], einer Verordnung zum Umweltschutzgesetz, beurteilt. Dazu wird eine zweistufige Risikoabschätzung vorgenommen, im Rahmen derer die Sicherheit aus dem Blickwinkel möglicher Gefahrgutfreisetzungen zu beurteilen ist. Diese Risikoabschätzungen sind grundsätzlich auch für Tunnel vorzunehmen. Die Störfallverordnung, welche auf stark risikoorientierten Ansätzen beruht, gibt zudem einzuhaltende Kriterien vor, anhand derer die abgeschätzten Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter bewertet werden können. Die Störfallverordnung erlaubt somit eine Beurteilung der Tragbarkeit der Risiken bzw. des Handlungsbedarfs, legt aber keine spezifi-

schen technischen oder baulichen Anforderungen an etwaig vorzusehende weitergehende Sicherheitsmaßnahmen fest.

USA

Die Anforderungen an die Ausgestaltung von Straßentunneln in den USA gemäß NFPA 502 [28] basieren weitgehend auf maßnahmenorientierten Ansätzen. Risikoorientierte Ansätze finden sich nur punktuell. So etwa für den Bereich der Lüftung, wo Abweichungen zu den Vorgaben möglich sind, sofern ein gleichwertiger Stand der Sicherheit über andere Maßnahmen gewährleistet werden kann.

Weitere Abklärungen

Für folgende Länder wurden ebenfalls Abklärungen vorgenommen, jedoch keine detaillierten Auswertungen von Normen durchgeführt:

- Norwegen: Es liegt eine Grundlage zur risikobasierten Sicherheitsplanung vor ("Risikoanalyse av brann i vegtunneler" [18]), jedoch nur in norwegischer Sprache.
- Japan: Soweit bekannt, wurden in Japan bislang keine Risikoanalysen im Zusammenhang mit Straßentunneln erarbeitet [29].
- Niederlande: Es wurden keine normativen Grundlagen im Zusammenhang zu risikobasierter Sicherheitsplanung gefunden.

A 1.4 Schlussfolgerungen

Die Auswertung der Anforderungen an die Sicherheitsmaßnahmen in den untersuchten normativen Grundlagen zeigt, dass mehrheitlich maßnahmenorientierte Ansätze verfolgt werden. Risikoorientierte Überlegungen fließen teilweise über risikorelevante Einflussgrößen wie etwa Verkehrsaufkommen oder Tunnellänge ein, welche die Anforderungen an die Sicherheitsmaßnahmen mitbestimmen. Basierend darauf können die spezifisch vorzusehenden Maßnahmenstandards (eingeteilt nach entsprechenden Klassen) abgeleitet werden. Die in den untersuchten Grundlagen erwähnten risikoorientierten Ansätze können jedoch nicht als eigentliche Risikoanalyse betrachtet werden.

Ein wie in der EG-Richtlinie [1] verlangter Sicherheitsnachweis mittels einer Risikoanalyse (Art. 13), wenn geforderte bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können bzw. wenn sie nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten realisiert werden können, wird mit Ausnahme der RABT 2003 [2] in keiner der untersuchten normativen Grundlagen thematisiert. Obwohl in einigen Staaten Ansätze zur Sicherheitsbewertung mittels Risikoanalysen ausgearbeitet worden sind, haben die entsprechenden methodischen Grundlagen bislang keinen Eingang in die jeweiligen Normen und Richtlinien gefunden.

Auch die Auswertungen des "FIT" [3] zeigen ein entsprechendes Ergebnis. Einzig in der dort untersuchten norwegischen Richtlinie "Risikoanalyse av brann i vegtunneler" [18] werden gemäß des Auswertungen des "FIT" praxisorientierte Anforderungen an Risikoanalysen (für Brandereignisse) in Straßentunneln dokumentiert.³

Hinsichtlich der für das Forschungsprojekt maßgeblichen Fragestellungen zeigt sich, dass sich in den ausgewerteten normativen Grundlagen zwar teilweise Hinweise auf die Forderungen nach risikoorientierten Betrachtungen bzw. nach Risikoanalysen finden, konkrete methodische Anforderungen oder Hilfestellungen gibt es jedoch nur punktuell. Werden Hinweise genannt, so wird in den meisten Fällen eine pragmatische Abschätzung (z. B. Österreich, Großbritannien) anhand einfacher Formeln o. ä. aufgezeigt bzw. auf weitergehende Studien (z. B. OECD/PARC [16]) verwiesen. Zudem zeigt sich, dass risikoorientierte Ansätze primär im Zusammenhang mit möglichen, vergleichsweise seltenen Großereignissen wie etwa Tunnelbränden oder Freisetzungen von Gefahrgütern erwähnt bzw. gefordert werden.

³ Die norwegische Richtlinie "Risikoanalyse av brann i vegtunneler" [18] ist nur in norwegischer Sprache verfügbar.

Anhang 2 Ansätze der Sicherheitsbewertung

Nachfolgend werden die maßgeblichen Charakteristika der im Sinne der vorliegenden Forschungsarbeit wichtigsten dargestellten Methodikbausteine zusammengefasst. Die Beschreibungen sind analog zum Vorgehen zur Sicherheitsbewertung in die drei Bereiche Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung gegliedert. Dabei werden jeweils folgende Eigenschaften erläutert:

- Methode
- Beschreibung
- Anwendungsbereiche
- Vor-/Nachteile

Methodikbausteine Risikoanalyse

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Experten-schätzung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Expertenschätzung wird die Aussage eines oder mehrerer Experten aus dem betreffenden Fachgebiet zu einer konkreten Fragestellung bezeichnet. Die Schätzung widerspiegelt das Wissen und die Erfahrung dieser Fachleute. • Expertenschätzungen können sowohl qualitativ als auch quantitativ erfolgen. • Expertenschätzungen fließen als Basisbaustein in weiteren Methoden ein (z. B. beim Brainstorming oder der Delphi-Befragungs-Methode). 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzen von Häufigkeit, Ausmaß und Risiko von Gefahren • Vergleichende Bewertung von Häufigkeit, Ausmaß und Risiko • Generierung von Maßnahmen, Abschätzung der Kosten von Maßnahmen, Abschätzung einer möglichen Risikoreduktion durch Maßnahmen • Geeignet zur Abschätzung in Teilsystemen oder bei fehlenden Daten Grundlagen • Plausibilitätskontrollen 	<ul style="list-style-type: none"> + Der Aufwand ist gering. - Die „Güte“ einer Schätzung hängt direkt vom Wissens- und Erfahrungsschatz des Experten ab (große Streuung in den Aussagen). - Expertenschätzungen können durch (aktuelle, individuelle) Erfahrungen stark beeinflusst werden. Länger zurückliegende Erfahrungen gehen vergessen. - Gefahr der Betriebsblindheit („Es kann nicht sein, was nicht sein darf.“). - Bezug zu einer Gesamtbetrachtung fehlt.
What-If-Methode What-If Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Die What If-Methode ist eine kreative, brainstormartige Technik, die im Team durchgeführt wird. • Ausgegangen wird von der Fragestellung „Was passiert wenn....?“. Jedes Mitglied formuliert konkrete Fragen, die im Team beantwortet werden. Auf diese Weise werden mögliche Gefährdungen in einem Prozess erkannt. Es werden auch mögliche Gegenmaßnahmen formuliert. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikation und Analyse von Gefahren • Generierung von Maßnahmen • Instrument zur Planung oder Verbesserung eines Systems • Eher geeignet bei einfachen kausalen Zusammenhängen, problematisch bei komplexen Systemen 	<ul style="list-style-type: none"> + Mit relativ geringem Aufwand können mögliche Schwachstellen in einem System erkannt werden. - Die Qualität der Ergebnisse hängt direkt von der Zusammensetzung des Teams ab. - Die What If-Methode hat den Nachteil, dass unter Umständen wesentliche Elemente eines Systems übersehen werden. - Nicht einsetzbar als Sicherheitsnachweis

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Checklistenverfahren Checklist Analysis	<ul style="list-style-type: none"> Das Checklistenverfahren ist eine einfache, rein qualitative Methode für eine erste Einschätzung in ein System. Der Einsatz erfolgt häufig in Kombination mit anderen Methoden, oder als vorbereitende Analysemethode. Checklisten sind Fragelisten. Aufgrund von Checklisten wird ein System durchgegangen. Checklisten beinhalten über Jahrzehnte gesammelte Erfahrungen in den jeweiligen Bereichen und werden laufend fortgeschrieben. 	<ul style="list-style-type: none"> Methode wird zur Analyse von technischen Systemen und Prozessen eingesetzt. Das Checklistenverfahren ist in der chemischen Industrie verbreitet. Identifikation und Analyse von Gefahren Eignet sich vor allem für routinemäßige, sich wiederholende Überprüfungen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Anwendung des Checklistenverfahrens bietet vor allem den Vorteil eines einfachen Aufbaus und breiter Anwendungsmöglichkeiten. Das Checklistenverfahren erlaubt mit relativ geringem Aufwand einen ersten Überblick zu erhalten eine Vielzahl von potentiellen Sicherheitsproblemen zu erfassen. - Je komplexer das zu untersuchende System ist, desto unübersichtlicher werden die Checklisten. Es bleibt fraglich, ob alle wichtigen Aspekte eines Systems erkannt und beschrieben werden. - Neue Probleme, wie sie aus der Kombination prozessspezifischer Gegebenheiten ergeben können, werden nur ungenügend erfasst. Gekoppelte sowie Folgeereignisse werden schlecht erkannt. - Die Qualität der Analyse hängt direkt von der Vollständigkeit der Checkliste sowie stark vom Wissen der durchführenden Personen ab.
Safety Review, Safety Audit Sicherheitsüberprüfung, Sicherheitsrevision	<ul style="list-style-type: none"> Ziel einer Sicherheitsrevision ist die Überprüfung einer Anlage hinsichtlich Schwachstellen und Gefahren. In Gesprächen mit Betriebspersonal wird nach möglichen Gefahren bzw. nach Schwachstellen in den Anlagen gesucht. Das Vorgehen schließt eine Behebung der Anlage ein. 	<ul style="list-style-type: none"> Schwachstellenanalyse Generierung von Maßnahmen Verbesserung eines bestehenden Systems oder einer bereits ausgearbeiteten Planung (aber: kein Planungsinstrument) 	<ul style="list-style-type: none"> + Relativ geringer Aufwand bis erste Ergebnisse vorliegen. + Die an den Interviews beteiligten Mitarbeiter können sich der vorhandenen Gefahren bewusst werden (Ausbildungseffekt). + Praxisbezogenes Verfahren - Keine Aussagen zur Größe einer Gefahr bzw. Schwachstelle - Nicht einsetzbar als Sicherheitsnachweis
Statistische Datenanalyse, Datenauswertung	<ul style="list-style-type: none"> Mit der statistischen Datenanalyse wird gemachte und festgehaltene Erfahrung ausgewertet. Die Auswertungen können bezüglich Häufigkeit und Ausmaß erfolgen. Bei genügendem Datenumfang sind auch Angaben zu Verteilungstypen, Standardabweichungen, etc. sinnvoll. Neben der eigentlichen Datenauswertung ist immer auch eine Interpretation erforderlich. 	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet in Systemen mit folgenden Eigenheiten: <ul style="list-style-type: none"> - Bekannte Technik - Genügend Ereignisdaten Aus den Ergebnissen von statistischen Datenauswertungen kann direkt auf Risiken geschlossen werden. Sie können aber auch Inputs für Fehlerbäume oder für Ereignisablaufbäume liefern. Statistische Datenanalysen sind eine maßgebende Grundlage aller quantitativen Analysen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Zentraler Bezug zwischen „Wirklichkeit“ und Modellen - Die Randbedingungen, unter denen die Daten erfasst wurden, sind uneinheitlich und zum Auswertungszeitpunkt oft nicht mehr bekannt. - Mögliche Großereignisse sind oft nicht im Untersuchungszeitraum enthalten (Unvollständigkeit)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
FTA Fault Tree Analysis Fehlerbaum-analyse	<ul style="list-style-type: none"> Die Aufgabe einer FTA besteht in der Ermittlung der logischen Verknüpfungen von Komponenten- oder Teilsystemzuständen eines Systems, die zu einem unerwünschten Ereignis (Top event) führen können. In der praktischen Anwendung bedeutet dies die systematische Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen (Ursachen) und dahinter liegender Basisereignisse, die zu einem vorgegebenen Top event führen können. Eine FTA findet bei einer deduktiven Fragestellung Verwendung (Abwärtslogik). Ausgangssituation ist ein definierter Systemzustand (Top event), der weiter top down (von oben herab) bis zu einem Basisereignis aufgeschlüsselt wird. Für die quantitative Ermittlung der Eintrittshäufigkeit des Top events werden Zuverlässigkeitskenngrößen zu den einzelnen betrachteten Basisereignissen benötigt. 	<ul style="list-style-type: none"> FTA werden bei der Planung neuer wie bei der Analyse bestehender Systeme, aber auch für eine Untersuchung im Versagensfall, angewendet. FTA kann zur Analyse aller technischen Systeme eingesetzt werden. Analyse der Ursachen von unerwünschten Ereignissen (Top event) Bestimmung der Häufigkeit von unerwünschten Ereignissen (Top event) Zeigt die Ansatzpunkte für Maßnahmen in einem System. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die FTA erlaubt scharfe quantitative Aussagen. + Die Darstellung in einem logischen Fehlerbaum fördert den Einblick und das Verständnis in nicht leicht erkennbare Zusammenhänge und Verknüpfungen. + Mit einer FTA können auch Ereignisse betrachtet werden, über die keine direkte Information vorhanden ist, bei denen jedoch auf der Ebene der Komponenten das Verhalten bekannt oder besser abschätzbar ist. - Bei großen Systemen können die Fehlerbäume stark verzweigt und sehr kompliziert werden (zeitlicher Aufwand). - Oft ist auch auf der Komponentenebene die statistische Information ungenügend, so dass Schätzungen mit Expertenwissen notwendig sind (Genauigkeit der Ergebnisse). - Das verfügbare statistische Datenmaterial und die Vielzahl der Einflussfaktoren erlauben häufig nur eine vergleichende Beurteilung von Varianten.
ETA Event Tree Analysis Ereignisablaufanalyse	<ul style="list-style-type: none"> In der ETA werden Ereignisse ermittelt, die sich aus einem vorgegebenen Ausgangsereignis entwickeln können. Es handelt sich um eine induktive Analyse, d.h. man geht von einem Anfangsereignis aus und ermittelt die Folgeereignisse (Vorwärtslogik). Die Aufgabe einer ETA besteht im Erfassen der Ereignisabläufe in einem (größeren) System oder einer Anlage, die nach einem auslösenden Ereignis (Ausgangsereignis) durch die Reaktion nachfolgender Subsysteme entstehen können. Damit werden die Folgen, die ein auslösendes Ereignis in einem System verursacht, schrittweise bis zu einem Endzustand des Systems (Anlagenzustand „Funktion“ oder „Ausfall“) verfolgt. Jedes Ereignis in dieser Kette hat die Folgen der vorausgehenden Ereignisse zu tragen. Mit Hilfe einer einfachen grafischen Darstellungsweise werden die logischen Abläufe unter der Bedingung aufgezeigt, dass die nacheinander folgenden Subsysteme ausfallen oder funktionieren (binäre Logik). 	<ul style="list-style-type: none"> ETA kann zur Beschreibung und Quantifizierung von Ereignisabläufen aller Art angewendet werden. Sie wird bevorzugt zur Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt. Analyse der Abläufe (Folgen) von Ereignissen Bestimmung der Häufigkeit von Ereignissen Zeigt die Ansatzpunkte für Maßnahmen in einem System. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die ETA erlaubt scharfe quantitative Aussagen. + Die ETA zeigt und strukturiert systematisch die möglichen Folgen eines Ereignisses. - In großen Systemen verzweigen die Bäume stark und werden unübersichtlich (auch ein Darstellungsproblem). - Ähnliche Nachteile und Schwierigkeiten wie bei der FTA

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
CCA Cause-Consequence Analysis Ursachenfolgeanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Die Methode der CCA verknüpft die Fehlerbaumanalyse FTA und die Ereignisbaumanalyse ETA. Die CCA wird zur Ermittlung von relevanten Ereignisszenarien verwendet. Fehler, die zu einem kritischen Ereignis führen können, werden mit der FTA, die möglichen Auswirkungen mit der ETA analysiert. siehe FTA und ETA 	<ul style="list-style-type: none"> CCA wird bevorzugt zur Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt. siehe FTA und ETA 	<ul style="list-style-type: none"> + CCA ist sehr flexibel einsetzbar und es ergibt sich eine gute Dokumentation der Ereignisabläufe. • Weitere Vor- und Nachteile: siehe FTA und ETA
Ausbreitungs- und Wirkungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> Ziel von Ausbreitungs- und Wirkungsanalysen ist die quantitative Bestimmung des Ausmaßes von Ereignissen. Dazu sind mehrere Schritte notwendig. Ausbreitungsanalyse, Expositionsanalyse, Wirkungsanalyse. Mit einer Ausbreitungsanalyse wird die räumliche und zeitliche Ausbreitung freigesetzter Stoffe in der Umgebung ermittelt. Unter Berücksichtigung von den Umgebungseigenschaften und atmosphärischen Bedingungen werden einerseits die Schadstoffkonzentration bzw. Hitze oder Druck am Wirkungsort bestimmt. Mit einer Expositionsanalyse wird untersucht, welche Objekte sowie Personen in einer konkreten Situation gefährdet sind. Es wird untersucht was oder wer sich wie lange und wie geschützt innerhalb von bestimmten Gefährdungszonen befindet. Mit der Wirkungsanalyse wird abgeschätzt, welche Auswirkungen Giftigkeit, Hitze oder Druck auf das gefährdete Objekt bzw. Personen haben. Bei der Wirkung auf Menschen können Letalitätsmodelle eingesetzt werden. Das Ausmaß, das durch eine Freisetzung von gefährlichen Stoffen bzw. durch eine Energiefreisetzung hervorgerufen werden kann, ist u.a. von Art und Menge des Stoffes, dem Freisetzungsvorgang, dem Ausbreitungsverhalten und den Dosis-Wirkungsbeziehungen bei radioaktiven oder toxischen Stoffen oder seinem Brand- oder Explosionsverhalten abhängig. Das Verfahren eignet sich deshalb nur dann, wenn die im Ereignis involvierten Stoffe bekannt sind, und deren Wirkung auf Personen oder Objekte abgeschätzt werden kann. 	<ul style="list-style-type: none"> Für vertiefte Analysen, vorwiegend in Betrieben mit einem hohen Gefahrenpotential (chemische Industrie) und in empfindlicher Umgebung. Für eine eng definierte Fragestellung: wenige, klar definierte Stoffe, bekannte Umgebungssituation. 	<ul style="list-style-type: none"> + Das Vorgehen erlaubt detaillierte, quantitative Aussagen zum Ausmaß eines Ereignisses. + Komplizierte Rechenmodelle sind in Computerprogrammen integriert. - Der Aufwand für detaillierte Ausbreitungs- und Wirkungsanalysen kann groß werden - Spezifische Modelle beschränken sich auf einen engen Einsatzbereich. Die Wirklichkeit lässt sich unter Umständen nur schwer in einem Modell abbilden. - Konkrete Wirkung auf Personen (Letalitäten) zur Abschätzung des quantitativen Ausmaßes meist unbekannt (Annahmen, Analogieschlüsse notwendig, was unter Umständen zu größeren Ungenauigkeiten führen kann). - Eichung der Modelle an „tatsächlichem“ Ausmaß oft problematisch (Über- oder Unterschätzung möglich).

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Simulationen	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Tätigkeit (Prozess) wird modelliert und mehrfach durchgespielt. Das Modell enthält insbesondere alle sicherheitsrelevanten Elemente, die beispielsweise mit einer gewissen Häufigkeit versagen können. Als Output lassen sich Ereignishäufigkeiten oder Risiken darstellen. • Dynamische Simulationsmodelle können einerseits zeitliche Abhängigkeiten und andererseits das Zusammenspiel von mehreren Teilsystemen berücksichtigen. • Durch Veränderungen am System kann beispielsweise der Einfluss einzelner Sicherheitsmaßnahmen auf das Gesamtsystem geprüft werden (Änderung von Komponenten, Eingriffe in den Betrieb). 	<ul style="list-style-type: none"> • Kreisläufe, in denen sich ein Prozess mehrfach wiederholt und die jeweilige Ausgangssituation variabel ist (dynamisches System). • Simulieren einer Tätigkeit: Beispielsweise mehrfaches Befahren einer Strecke mit verschiedenen Möglichkeiten für Ereignisse (z. B. ein Jahr simulieren). 	<ul style="list-style-type: none"> + Aussagen zu einem Gesamtsystem möglich. + Optimales Abbild der Realität in einem Modell. + Möglichkeit, die Wirkung von Eingriffen (Maßnahmen) ins System zu prüfen. - Aufwand kann sehr groß werden. Braucht allenfalls spezifische EDV-Programme (spezielle Entwicklungen). - Das Verhalten der Systemelemente muss bekannt sein (bedingt beispielsweise vorgängige Analysen mit Fehlerbäumen etc.).

Methodikbausteine Risikobewertung

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Expertenmeinung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Expertenmeinung wird die Aussage eines oder mehrerer Experten aus dem betreffenden Fachgebiet zu einer konkreten Fragestellung bezeichnet. Die Meinung widerspiegelt das Wissen und die Erfahrung dieser Fachleute. • Expertenmeinungen können sowohl qualitativen als auch quantitativen Charakter haben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Expertenmeinungen als Beurteilungsinstrument sind bei allen Fragestellungen anwendbar. • Eignet sich für eine erste Grobbeurteilung komplexer Fragestellungen sowie für die Beurteilung von Routinefragen. • Entspricht der traditionellen Methode der Juristen. Teilweise auch Gutachter-tätigkeit im Ingenieurwesen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Der Aufwand ist gering. - Die „Güte“ einer Expertenmeinung hängt direkt vom Wissens- und Erfahrungsschatz des Experten ab (große Streuung in den Aussagen). - Expertenmeinungen können durch (aktuelle, individuelle) Erfahrungen stark beeinflusst werden. Länger zurückliegende Erfahrungen gehen vergessen. - Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Vergleichbarkeit verschiedener Fragestellungen sind nicht gegeben. - Akzeptanz bei komplexen Fragestellungen in der Öffentlichkeit ist fraglich. - Keine expliziten Aussagen zu verbleibenden Risiken.
Stand der Technik / Vorgaben, Normen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Risikobewertung erfolgt durch den Nachweis, dass das untersuchte System dem Stand der Technik entspricht. • Die Bewertung anhand des Standes der Technik entspricht einem maßnahmenorientierten Ansatz. Die Risikobewertung erfolgt nicht anhand von Risiken, sondern am Vorhandensein gewisser Maßnahmen oder am Erreichen gewisser Merkmale (z. B. einer bestimmten Schadstoffkonzentration). • Das Vorgehen nach dem Stand der Technik ist eng gekoppelt mit der Maßnahmenplanung und -beurteilung. 	<ul style="list-style-type: none"> • Beurteilung von Fragen aus Bereichen, wo sich ein Stand der Technik herauskristallisiert hat (traditionelle Bereiche). 	<ul style="list-style-type: none"> + Relativ geringer Aufwand, wenn der Stand der Technik klar definiert vorliegt. + Gedanklich einfacher und nachvollziehbarer Ansatz. + Vorgehen entspricht der Tradition bzw. den Gewohnheiten. - Maßnahmenorientierter Ansatz: Es erfolgt kein Bezug zu Risiken (bzw. zum Stellenwert des Problems). - Keine expliziten Aussagen zu verbleibenden Risiken. - Die Verhältnismäßigkeit etwaiger zusätzlicher Maßnahmen wird nicht berücksichtigt.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
			<ul style="list-style-type: none"> - Wenig geeignet für neue Fragestellungen, bei denen noch kein Stand der Technik definiert ist. - Vergleichbarkeit zu anderen Fragestellungen ist nur bedingt gegeben.
Vergleich/Grenzwert von Häufigkeiten oder Ausmaß	<ul style="list-style-type: none"> • Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). 	<ul style="list-style-type: none"> • Quervergleiche in einem Bereich oder in eindeutig vergleichbaren Bereichen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. - Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. - Die Häufigkeit bzw. das Ausmaß ist nur ein Teilaspekt des Risikos (unvollständige Aussage). - Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Systemen mit stark unterschiedlichen Szenarien ist nicht gegeben. - Indem nur einzelne oder mehrere Szenarien bewertet werden, ist eine Aussage zum Gesamtsystem nicht möglich.
Vergleich/Grenzwert von individuellen Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). • Der Vergleich erfolgt über das individuelle Risiko r eines Benützers/Betroffenen. Das individuelle Risiko berücksichtigt alle im System auftretenden Szenarien und deren Wirkung auf die betrachtete Person. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignet für einen quantitativen Sicherheitsnachweis: z. B. bei Arbeitssicherheit, bei der Ausübung bestimmter Tätigkeiten (auch im Verkehr). • Überall dort einsetzbar, wo Referenzwerte vorhanden sind oder sich abschätzen lassen. • Meist dort eingesetzt, wo einzelne (wenige) Personen hohen Gefährdungen ausgesetzt sind. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. + Das individuelle Risiko umfasst alle aus dem betrachteten System auf eine Person wirkenden Gefahren und ergibt deshalb ein vollständiges Bild der Gefährdung. + Werden die individuellen Risiken aus einem neuen System und einem Referenzsystem mit den gleichen Methoden und Grundlagen berechnet, nimmt die Schärfe der Aussage zu (systematische Fehler werden eliminiert). + Quervergleiche über verschiedene Bereiche hinweg sind möglich. - Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand, fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. - Annahme, dass vorhandene individuelle Risiken akzeptiert sind, muss nicht unbedingt richtig sein. - Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht gewährleistet.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Vergleich/Grenzwert von kollektiven Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). Der Vergleich erfolgt auf dem Niveau des kollektiven Risikos R_0. Die ermittelten kollektiven Risiken eines Systems werden mit denjenigen eines Referenzsystems verglichen. 	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für einen quantitativen Sicherheitsnachweis in eindeutig vergleichbaren Systemen: z. B. Routenwahl für einen Transport von A nach B. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. + Mit dem kollektiven Risiko wird das Gesamtsystem (alle Szenarien) erfasst und ergibt deshalb ein vollständiges Bild der Gefährdung. + Werden die kollektiven Risiken aus einem System und einem Referenzsystem mit den gleichen Methoden und Grundlagen berechnet, nimmt die Schärfe der Aussagen zu (systematische Fehler werden eliminiert). - Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Systemen ist nicht gegeben, da die Größe des Systems (z. B. Streckenlänge) und Merkmale, beispielsweise aus dem Betrieb, das kollektive Risiko direkt beeinflusst (verfälschen). - Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand, fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. - Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht gewährleistet.
Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen	<ul style="list-style-type: none"> Die Darstellung von kollektiven Risiken im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm zeigt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Wert für das Schadenausmaß im gegebenen System erreicht oder überschritten wird. Durch die Festlegung einer Akzeptanzlinie im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm wird implizit auch der Grenzwert des akzeptierten kollektiven Risikos festgelegt. 	<ul style="list-style-type: none"> Störfallsicherheit für Transport und Lagerung von Gefahrgütern (Schweiz) Bewertung von chemischen Gefahrenpotentialen Bewertung von kollektiven Risiken. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung mittels Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ist einfach verständlich und leicht kommunizierbar. + Die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wird berücksichtigt (bei Akzeptanzbereichen) - Die Bewertung erfolgt unabhängig von der Größe des betrachteten Systems, d.h. große Systeme sind à priori im Nachteil. - Der Vergleich verschiedenartiger Systeme ist schwierig (Festlegen der Akzeptanzlinie). - Linienförmige Systeme (Verkehrswege) müssen in geeignete Einheiten zerlegt werden. Das Festlegen einer sinnvollen Größe dieser Einheiten stellt ein Normierungsproblem dar.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Risiko-Kosten-Diagramm mit Grenzkosten	<ul style="list-style-type: none"> Das kollektive Risiko eines technischen Systems kann (in der Regel) stets durch weitere Sicherheitsmaßnahmen gesenkt werden, und zwar umso mehr, je größer die dafür eingesetzten Aufwendungen (Kosten) sind. Dabei muss vorausgesetzt werden, dass hier jeweils alle denkbaren Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen berücksichtigt werden. Jede Maßnahme oder Maßnahmenkombination ist durch eine bestimmte Reduktion des kollektiven Risikos und durch bestimmte Kosten charakterisiert. Sie lässt sich als Punkt in einem Risiko-Kosten-Diagramm darstellen. Die untere Umhüllende der Punkteschar bildet die optimale Risikoreduktionsstrategie: Wenn Maßnahmen in der Reihenfolge dieser Kurve getroffen werden, so resultiert für ein gegebenes Kostenniveau die größtmögliche Reduktion des Risikos. Jedes technische System lässt sich damit auch durch seine charakteristische Risikoreduktionskurve im Risiko-Kosten-Diagramm charakterisieren. Das Prinzip der Kostenwirksamkeit sagt aus, dass die kollektiven Risiken eines Systems bis zu jenem Punkt auf dessen Risikoreduktionskurve zu senken sind, bei dem eine bestimmte Kostenwirksamkeit der Maßnahmen erreicht wird. Systeme, die als gleich sicher bezeichnet werden, können durchaus unterschiedlich hohe kollektive (Rest)Risiken aufweisen. 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort sinnvoll, wo ein Eigentümer/Benutzer die maximale Sicherheit in seinem System oder seinen verschiedenen Systemen erreichen will, aber die Mittel beschränkt sind und nicht ausreichen, um alle (bekannt)en Maßnahmen zu ergreifen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Systemgröße fließt in die Betrachtung mit ein, was einen Vergleich verschiedener Systeme ermöglicht. + Berücksichtigt einen optimalen Mitteleinsatz, die Verhältnismäßigkeit ist explizit gewährleistet. + Liefert die maximale Sicherheit im betrachteten System bei begrenzten zur Verfügung stehenden Mitteln. – Erfordert Kenntnisse über mögliche Maßnahmen, deren Kosten und Wirksamkeit (Aufwand). – Sicherheitsniveau wird indirekt über die Verhältnismäßigkeit zusätzlicher Maßnahmen definiert (Kommunizierbarkeit). – Keine harte Grenze für das kollektive Risiko. Unterschiedlich hohes (Rest)Risiko in verschiedenen Systemen möglich.

Methodikbausteine Maßnahmenplanung

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Experten-schätzung	<ul style="list-style-type: none"> Experten schlagen Maßnahmen vor oder ordnen sie an. Die Basis dafür bildet deren Erfahrung sowie alle weiteren verfügbaren Informationen. 	<ul style="list-style-type: none"> Expertenschätzungen als Beurteilungsinstrument für Maßnahmen sind bei allen Fragestellungen anwendbar. Eignet sich für eine erste Grobbeurteilung von Maßnahmen sowie für die Beurteilung von Routinefragen. Im Rahmen einer Gutachter-tätigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Vgl. Bewertungsmethodik „Expertenmeinung“. – Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Vergleichbarkeit der Anordnung / des Vorschlags verschiedener Maßnahmen sind nicht gewährleistet. – Keine expliziten Aussagen zur Wirksamkeit von Maßnahmen und zu verbleibenden Risiken.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Stand der Technik / Vorgaben / Normen	<ul style="list-style-type: none"> Die Maßnahmenplanung bzw. die Beurteilung von Maßnahmen wird durch den Stand der Technik vorgegeben. Vgl. Bewertungsmethodik „Stand der Technik“. 	<ul style="list-style-type: none"> Beurteilung von Maßnahmen aus Bereichen, wo sich ein Stand der Technik herauskristallisiert hat (traditionelle Bereiche). 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Stand der Technik“. Keine expliziten Aussagen zur Wirksamkeit von Maßnahmen und zu verbleibenden Risiken. Die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wird nicht berücksichtigt.
Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich Häufigkeiten oder Ausmaß	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich der Häufigkeit bzw. Schadensausmaß von Gefahrenszenarien beurteilt. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort einsetzbar, wo der Einfluss von Maßnahmen nur auf eine der beiden Komponenten des Risikos (Häufigkeit bzw. Ausmaß) der Gefahrenszenarien von Bedeutung ist. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von Häufigkeiten oder Ausmaß“
Wirksamkeitsüberlegungen im Häufigkeits- Ausmaß- Diagramm	<ul style="list-style-type: none"> Die Darstellung von kollektiven Risiken im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm zeigt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Wert für das Schadensausmaß im gegebenen System erreicht oder überschritten wird. Die Bewertung der Risiken erfolgt aufgrund einer festgelegten Akzeptanzlinie (oder Akzeptanzbereichen). Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit auf die Lage der Summenkurve im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm beurteilt. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen“. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen“. Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich W und A wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.
Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich individueller Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich des individuellen Risikos eines Benutzers/Betroffenen beurteilt. Das individuelle Risiko berücksichtigt alle im System auftretenden Szenarien und deren Wirkung auf die betrachtete Person. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von individuellen Risiken“. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von individuellen Risiken“. Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich individueller Risiken wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.
Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich kollektiver Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich des kollektiven Risikos eines Systems beurteilt. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von kollektiven Risiken“ 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von kollektiven Risiken“ Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich des kollektiven Risikos wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeits- und Kostenüberlegungen. Dabei wird die Wirksamkeit einer Maßnahme den Kosten, die sie verursacht, gegenübergestellt. Die Beurteilung der Maßnahme erfolgt aufgrund des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses. Maßnahmen mit einem kleineren Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis werden solchen mit einem größeren vorgezogen. Beim Prinzip des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses kann die Wirksamkeit von Maßnahmen grundsätzlich bezüglich individueller, kollektiver oder empfundener Risiken berücksichtigt werden. Üblich ist die Anwendung in Zusammenhang mit kollektiven und empfundenen Risiken. 	<ul style="list-style-type: none"> Kann kombiniert werden mit Bewertungsmethode „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm“ (vgl. diese Beschreibungen). 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethode „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm“. + Berücksichtigt explizit die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen
Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen im Risiko-Kosten-Diagramm	<ul style="list-style-type: none"> Das kollektive Risiko eines technischen Systems kann (in der Regel) stets durch weitere Sicherheitsmaßnahmen gesenkt werden, und zwar umso mehr, je größer die dafür eingesetzten Aufwendungen (Kosten) sind. berücksichtigt werden. Jede Maßnahme oder Maßnahmenkombination ist durch eine bestimmte Reduktion des kollektiven Risikos und durch bestimmte Kosten charakterisiert. Sie lässt sich als Punkt in einem Risiko-Kosten-Diagramm darstellen. Das Prinzip der Kostenwirksamkeit sagt aus, dass die kollektiven Risiken eines Systems bis zu jenem Punkt auf dessen Risikoreduktionskurve zu senken sind, bei dem eine bestimmte Kostenwirksamkeit der Maßnahmen erreicht wird. Für diesen Grenzwert für die Kostenwirksamkeit steht der Begriff der Grenzkosten. 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort sinnvoll, wo ein Eigentümer/Benutzer die maximale Sicherheit in seinem System oder seinen verschiedenen Systemen erreichen will, aber die Mittel beschränkt sind und nicht ausreichen, um alle (bekannten) Maßnahmen zu ergreifen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Systemgröße fließt in die Betrachtung mit ein, was einen Vergleich verschiedener Systeme ermöglicht. + Berücksichtigt einen optimalen Mitteleinsatz, die Verhältnismäßigkeit ist explizit gewährleistet. + Liefert die maximale Sicherheit im betrachteten System bei begrenzten zur Verfügung stehenden Mitteln. - Erfordert Kenntnisse über mögliche Maßnahmen, deren Kosten und Wirksamkeit (Aufwand). - Sicherheitsniveau wird indirekt über die Verhältnismäßigkeit zusätzlicher Maßnahmen definiert (Kommunizierbarkeit). - Keine harte Grenze für das kollektive Risiko. Unterschiedlich hohes (Rest-)Risiko in verschiedenen Systemen möglich.

Tabelle 3: Methodikbausteine für eine Sicherheitsbewertung

Allgemeine Erfahrungen mit quantitativen und qualitativen Methoden

Die Anwendung der verschiedenen Methodikbausteine in einem Gesamtverfahren ist je nach spezifischen Anforderungen und Komplexität der betrachteten Fragestellungen und Anwendungsgebiete unterschiedlich. Erfahrungsgemäß werden, insbesondere bei quantitativen Methoden, häufig verschiedene Methodikbausteine kombiniert angewendet. Oft ist es aber schwierig, die verwendeten Methoden/Methodikbausteine eindeutig zu identifizieren, da Mischformen zur Anwendung gelangen. Mit zunehmender Komplexität der Systeme (z. B. Kernenergie, che-

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

mische Industrie, Bauwesen oder Verkehrswege) werden i. d. R. verstärkt quantitative Methoden wie etwa Logische Bäume, Simulationen oder Ausbreitungs- und Wirkungsmodelle verwendet. Viele quantitative Verfahren stützen sich auf statistische Auswertungen ab, oftmals in Kombination mit Expertenschätzungen, beispielsweise um Lücken in den Datengrundlagen schließen zu können.

Die Erfahrung im Umgang mit Sicherheitsbewertungen zeigt, dass für systemübergreifende Sicherheitsbewertungen⁴ die Anwendung von quantitativen Methoden praktisch unumgänglich ist. Nur mit quantitativen Methoden kann eine anschauliche und vergleichbare Ermittlung und Bewertung von Risikokenngrößen gewährleistet werden. Durch die Quantifizierung kann somit die für eine Sicherheitsbewertung erforderliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit und damit auch die Möglichkeit der Vergleichbarkeit gewährleistet werden. Bei einer quantitativen Erfassung und Verarbeitung von Risikokenngrößen ordnet man sich einer strengen Logik der Informationsverarbeitung unter, wie sie bei qualitativen Methoden nicht annähernd erreichbar ist. Trotz der Quantifizierung bleibt oftmals das Problem, dass Risiken im Zusammenhang mit seltenen Ereignissen nur mit beträchtlichen Unschärfen ermittelt werden können. Diese Tatsache sowie der erhöhte Aufwand von quantitativen Risikoanalysen (QRA) stellen i. d. R. die Hauptkritikpunkte an der Durchführung von quantitativen Verfahren dar. Bei qualitativen "Expertenverfahren" besteht hingegen häufig die Gefahr, dass die beiden Komponenten Risikoanalyse und Risikobewertung nicht hinreichend voneinander abgegrenzt werden.

Methoden und Erfahrungen im Bereich Straßentunnel

Auch für Straßentunnel liegen heute methodische Ansätze zur Sicherheitsbewertung vor. Eine Übersicht über zur Verfügung stehenden Methoden und Modelle findet sich in [20]. In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die entsprechenden Auswertungen tabellarisch dargestellt.

⁴ Z. B. der Vergleich der Risiken für zwei verschiedene Straßentunnel

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Method	Qualitative or quantitative	Method or model	Accident types										Model aspects					Applicability		
			Traffic disturbance without damage	Collisions	Fire	Explosion	Leakage of aggressive and toxic materials	Nature (earthquakes, flooding)	Accidents for submerged tunnels	Dropped anchors, sunken ships	Hazard identification	Frequency calculation	Physical effects	Damage	Evacuation	Economics				
Hazard identification																				
Checklist	Qualitative/ Quantitative	Method											√							***
Casualty	Quantitative	Method											√							***
Fault tree analysis (FTA)	Qualitative/ Quantitative	Method											√	√						***
Event tree analysis (ETA)	Qualitative/ Quantitative	Method											√	√	√	√				***
Cause-consequence analysis	Qualitative	Method											√							*
What-if analysis	Qualitative	Method											√							*
Hazard and operability analysis (HAZOP)	Qualitative	Method											√							*
Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA)	Qualitative	Method											√							*
Deterministic risk analysis																				
Maximum credible accident analysis (MCA)	Quantitative	Method	Generally applicable method																***	
Dutch road tunnel scenario analysis	Qualitative/ Quantitative	Method	√	√	√	√	√	√					√		√	√	√	√		**
TNO- tunnel consequence model	Quantitative	Model		√		√									√	√	√	√		**
SIMULEX	Quantitative	Model		√		√										√				**
Probabilistic risk analysis																				
Fault tree analysis (FTA)	Quantitative	Method	Generally applicable methods										√	√						
Event tree analysis (ETA)	Quantitative	Method	Generally applicable methods										√	√	√	√				
QRAM	Quantitative	Method				√	√	√					√	√	√	√				**
TUSI	Quantitative	Model	√	√	√	√	√	√					√	√	√	√				*
QRA Procedure by Persson	Quantitative	Method				√	√	√					√	√	√	√	√			*
TunPRIM	Quantitative	Model	√	√	√	√	√	√					√	√	√	√	√			*
TNO- tunnel probabilistic model	Quantitative	Model				√							√	√	√	√	√			**

Abbildung 1: Überblick Methoden/Modelle zur Sicherheitsbewertung für Straßentunnel nach [20]

Die wichtigsten Erkenntnisse der Auswertungen können wir folgt zusammengefasst werden:

- Die angewandten Methoden und die für Straßentunnel entwickelten Modelle berücksichtigen in unterschiedlichem Umfang das Spektrum der möglichen Szenarien (vgl. Anhang 4), die sich in einem Tunnel ereignen können. Ein besonderes Schwergewicht wird typischerweise auf seltene Großereignisse wie Tunnelbrände und Freisetzungen von Gefahrgütern gelegt.
- Die Mehrzahl der spezifisch für Straßentunnel entwickelten Modelle fokussiert auf Gegenverkehrstunnel⁵.
- Der Aspekt der Sachschäden wird in einigen Modellen zwar erwähnt. Es findet sich jedoch keine eigentliche Methode um diese Schäden abbilden zu können.

Methodische Anforderungen der EG-Richtlinie und der RABT 2003

In der Richtlinie der EU [1] und in der RABT 2003 werden keine umfassenden detaillierten Vorgaben zu den methodischen Anforderungen für die Sicherheitsbewertung genannt. Dennoch finden sich Hinweise auf spezifische Teilaspekte hinsichtlich der Anforderungen der beiden Richtlinien, die bei der Sicherheitsbewertung zu berücksichtigen sind (vgl. Tabelle 4):

⁵ Tunnel mit einer Röhre

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Richtlinie	Anforderung an Methodik
EG-Richtlinie [1]	<ul style="list-style-type: none"> • Artikel 3, (2): Wenn ... bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können, die nicht oder nur zu <i>unverhältnismäßig hohen Kosten</i> verwirklicht werden können... • Artikel 3, (2): ... Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird anhand einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 nachgewiesen. ... <p><i>Bei der Maßnahmenplanung sind im Sinne der in Anhang 2 aufgezeigten Methodikbausteine die Aspekte der Kosten-Wirksamkeit zu berücksichtigen.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Artikel 3, (2): ...die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu diesen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Alternativmaßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. ... • Artikel 14, (1): Die Verwaltungsbehörde kann auf einen ordnungsgemäß dokumentierten Antrag des Tunnelmanagers hin Ausnahmen von den Anforderungen dieser Richtlinie gewähren, um den Einbau und die Verwendung innovativer Sicherheitseinrichtungen oder die Verwendung innovativer Sicherheitsverfahren zu ermöglichen, <i>die im Vergleich zum heutigen Stand der Technik, der den Vorgaben dieser Richtlinie zugrunde liegt, einen gleichwertigen oder höheren Schutz bieten.</i> <p><i>Bei der Risikobewertung ist im Sinne der in Anhang 2 über einen Vergleich von Risikowerten aufzuzeigen, dass für den Nachweiszustand⁶ mindestens ein gleichwertiges oder höheres Schutzniveau erreicht wird wie für den Referenzzustand⁷ (so genannter Sicherheitsnachweis).</i></p>
RABT 2003 [2]	<ul style="list-style-type: none"> • 2.3.3.2: ... Daher sind im Einzelfall Kosten-Risiko-Abwägungen und gegebenenfalls Sonderregelungen zu treffen, um eine technisch machbare und kostenmäßig vertretbare Lösung zu erreichen. <p><i>Bei der Maßnahmenplanung sind im Sinne der in Anhang 2 aufgezeigten Methodikbausteine die Aspekte der Kosten-Wirksamkeit zu berücksichtigen.</i></p>

⁶ Der Nachweiszustand entspricht Tunnel mit den Abweichungen von den normativen Vorgaben unter Berücksichtigung der kompensierenden technischen Maßnahmen.

⁷ Zustand bzw. Risikowert bei vollständiger Umsetzung der normativen Vorgaben.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Richtlinie	Anforderung an Methodik
	<ul style="list-style-type: none"> 4.: ...Hilfestellungen zur Untersuchungsmethodik für eine Entscheidung über mögliche Einschränkungen von Gefahrguttransporten oder von Transporten mit vergleichbaren Beladungen in Straßentunneln gibt das gemeinsame OECD/PIARC Projekt ERS⁸ und in Teilen die Schweizer Störfallverordnung⁹.

Tabelle 4: Methodische Anforderungen der EG-Richtlinie und der RABT 2003

In der nachfolgenden Abbildung 2 ist das prinzipielle Vorgehen grafisch dargestellt:

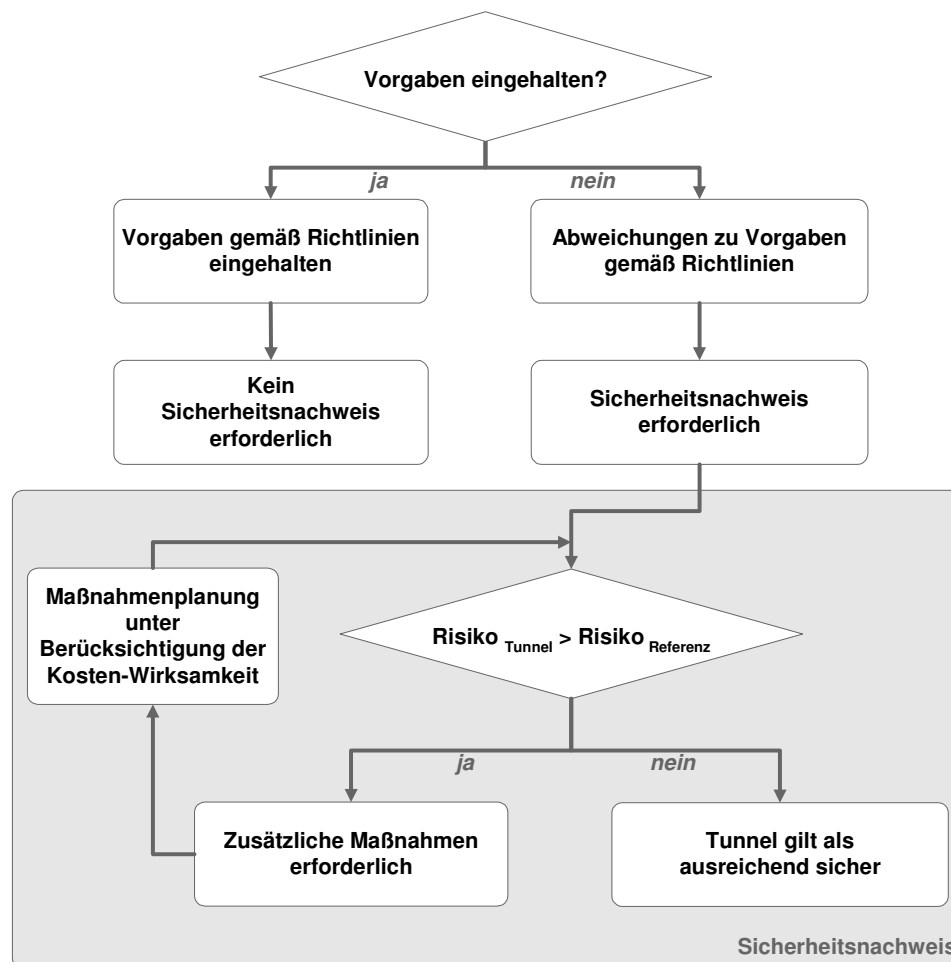


Abbildung 2: Prinzip des Sicherheitsnachweises

⁸ [16] gemäß Literaturverzeichnis

⁹ [17] gemäß Literaturverzeichnis

Zusammenfassend können die folgenden zwei maßgeblichen inhaltlichen Stoßrichtungen der beiden Richtlinien festgehalten werden:

- *Nachweis gleicher Sicherheit:* Die EG-Richtlinie legt die minimalen Anforderungen an die vorzusehende Ausgestaltung und Ausrüstung von Straßentunneln fest. Entspricht ein Tunnel diesen Anforderungen, so gilt die Richtlinie als erfüllt und weitergehende Sicherheitsbetrachtungen sind nicht erforderlich. Werden, z. B. aus Kostengründen oder beim geplanten Einsatz neuer Technologien, nicht alle Forderungen richtlinienkonform umgesetzt, so sind andere Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen, mit welchen mindestens dasselbe Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Im Rahmen eines Sicherheitsnachweises ist aufzuzeigen, dass dieses Sicherheitsniveau, trotz Abweichung zu den Vorgaben der Richtlinie, erreicht oder übertroffen wird.
- *Kosten-Wirksamkeit:* Zeigt sich aufgrund des Sicherheitsnachweises, dass aufgrund des Abweichens von den Vorgaben der Richtlinie weitergehende Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind, so sind dabei Aspekte der Kosten-Wirksamkeit zu berücksichtigen, um die Verhältnismäßigkeit der eingesetzten Mittel zu gewährleisten.

Anhang 3 Rechnergestützten Methoden für Sicherheitsbewertungen

A 3.1 Einleitung

In Abhängigkeit des methodischen Ansatzes für ein Analyse- und Bewertungsverfahren nimmt der Aufwand für eine Risikoanalyse und die Bewertung der resultierenden Risiken unterschiedliche Ausmaße an.¹⁰ Dabei steigt dieser Aufwand wegen der komplexen Zusammenhänge, die bei einer Sicherheitsbewertung von Straßentunneln erfasst werden müssen, von den qualitativen zu den quantitativen Methoden überproportional stark an. Im Rahmen dieses Projektes wird speziell auf die Methoden zur Durchführung von Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalysen, entsprechend der deutschen Normung DIN 25424 [21], [22] und DIN 25419 [23], eingegangen. Für die Sicherheitsbewertung von Straßentunneln als System mit zeitlich variablen und instationären Randbedingungen, bei denen menschliche Faktoren eine große Rolle spielen, sind rechnergestützte Methoden unabdingbar.

Die in diesem Abschnitt ausgewählten rechnergestützten Methoden behandeln ausschließlich Möglichkeiten und Programme, mit denen Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysen durchgeführt werden können.

Die Hauptanwendung bestehender rechnergestützter Methoden für quantitative Risikoanalysen (QRA) liegt heute u.a. im Bereich der Chemieindustrie und der Kernkrafttechnologie. Bei diesen Anwendungen handelt es sich um stationäre Anlagen, für welche die zeitlich variablen Randbedingungen und der Einfluss menschlichen Verhaltens (aufgrund des vergleichsweise hohen Grades an Automatisierungen) einen geringeren Stellenwert haben. Weitere wichtige Einsatzbereiche sind die Luft- und Raumfahrt sowie die Medizin. Hier führt eine Vielzahl von zeitlich variablen Randbedingungen und menschlichen Entscheidungen, die in Zusammenhang mit den vorhandenen stationären Anlagen stehen, zu einer deutlich komplizierteren QRA.

Das System zur Erfassung eines Straßentunnels ist ebenfalls in hohem Maße von zeitlichen Randbedingungen und menschlichen Einflüssen (Verhalten der Verkehrsteilnehmer etc.) abhängig. Rechnergestützte Anwendungen sind hierzu bisher nur in geringem Umfang vorhanden.

Die näher betrachteten Programme, deren Funktionen ausführlich in Anhang 3 beschrieben werden, sind:

- Fault Tree+, Version 11 der Firma IsographDirect, Newport Beach Kanada
- Relex, Version 7.7 der Firma Relex Software, Greensburg USA
- Cara-Fault-Tree, Version 4.1 der Firma Sydvest, Trondheim Norwegen

Da im Regelfall Tabellenkalkulationsprogramme wie z. B. MS Excel zum üblichen Umfang handelsüblicher Softwarepakete gehört, wird zudem vorgängig für diese Programme der Grad einer

¹⁰ Rechnergestützte Methoden werden primär für den analytischen Teil (Risikoanalyse) einer Sicherheitsbewertung eingesetzt.

Eignung für die QRA kurz erläutert. Tabellenkalkulationsprogramme bieten durch ihre Struktur nur eingeschränkte Möglichkeiten zur Lösung der Aufgaben. Für eine Risikoanalyse wird i. d. R. eine Vielzahl von Fehler- und Ereignisbäumen benötigt. Darüber hinaus besitzen diese meist sehr viele Ereignisebenen. Eine Durchführung mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen ist alleine beim Aufbau der Bäume sehr aufwendig. Außerdem beinhalten diese Programme oftmals keine ausreichenden statistischen Funktionen. So müsste für Basisereignisse die komplette Rechnung (nur Handrechenverfahren möglich) angegeben werden. Werden im Nachgang Ergänzungen an der Struktur bestehender logischer Bäume erforderlich, sind diese nur mit großem Aufwand zu implementieren, da eine automatische Erkennung von Zusammenhängen durch eine fehlende grafische Eingabe nicht möglich ist. Auch Kontrollmöglichkeiten durch einen Systemcheck können mit erheblichem Aufwand verbunden sein. Eine Eignung als Grundlage für eine spezifische Risikoanalyse-Software ist deshalb in den meisten Fällen höchstens für Aufgabenstellungen mit geringem Umfang sinnvoll. Bei einem Versionswechsel (Fortschreiben des Programms) ist überdies häufig die Funktion komplexer Programmierungen nicht gewährleistet.

Vergleichende Gegenüberstellung der Programme zur QRA

In der folgenden zusammenfassenden Gegenüberstellung werden für die QRA wesentliche Funktionen sowie die Bedienung der drei in Kapitel A 3.8 beschriebenen Programme Fault Tree+ Version 11, Relex 7.7 und Cara-Fault-Tree 4.1 verglichen.

A 3.2 Grafische Erstellung von Fehlerbäumen

Die Erstellung eines Fehlerbaums stellt in keinem der betrachteten Programme ein Problem dar. Sie erfolgt schnell und unkompliziert.

Ein wesentlicher Unterschied besteht in den Arten von Gates und Events, die erzeugt werden können. Hier schneidet Cara-Fault-Tree am schlechtesten ab, da kein NOT-Gate vorhanden ist. Die größte Anzahl an Gates beinhaltet Relex. Dies bedeutet aber keinen Vorteil zu Fault Tree+, da Fault Tree+ ebenfalls sehr viele verschiedene Gates benutzt, mit denen auch die Funktionen der zusätzlichen Gates von Relex dargestellt werden können.

Für die Darstellung von Events gibt es zwischen den Programmen keine größeren Unterschiede.

Die Optik der Fehlerbäume erscheint bei Relex besonders übersichtlich, da hier unterschiedliche Farben für die einzelnen Funktionen verfügbar sind.

Den besten Gesamteindruck bei der Bedienung hinterlässt aber Fault Tree+, bei dem die Navigation durch eine explorerähnliche Arbeitsoberfläche am übersichtlichsten ist. Cara-Fault-Tree kann durch einen „Zoom-Balken“ ebenfalls eine relativ gute Übersichtlichkeit garantieren. Bei Relex dagegen werden große Fehlerbäume schnell sehr unübersichtlich.

A 3.3 Grafische Erstellung von Ereignisbäumen

Fault Tree+ und Relex arbeiten bei der Generierung von Ereignisbäumen relativ identisch. Die Optik des Ereignisbaums ist bei Fault Tree+ insgesamt ansprechender.

In Cara-Fault-Tree können keine Ereignisbäume erzeugt werden.

A 3.4 Berechnungsmodelle und ihre Parameter

Bei Fault Tree+ werden die meisten für eine Analyse maßgeblichen Parameter berücksichtigt. Cara-Fault-Tree und Relex besitzen diesbezüglich einen geringen Funktionsumfang.

Entsprechend der vielfältigen Parameter fällt auch die Anzahl der wählbaren Modelle sehr groß aus. Relex hat nur eine sehr beschränkte Wahl an Modellen im Gegensatz zu Fault Tree+. Bei Cara-Fault-Tree dagegen können keine Modelle gewählt werden. Die Parameter können hier frei mit einer durchzuführenden Analyse kombiniert werden. Dies kann von Vorteil sein, wenn man ein Modell zur Analyse wünscht, welches bei den anderen Programmen nicht zur Verfügung steht. Nachteilig ist aber, dass immer überprüft werden muss, mit welchen Parametern welche Analyse möglich ist.

Common Cause Failure-Modelle (CCF) sind nur bei Fault Tree+ und Relex verfügbar. Die Varianten sind identisch.

Bei Cara-Fault-Tree kann man zwischen verschiedenen Berechnungsmethoden wählen, was bei den anderen Programmen nicht möglich ist, da diese fest an die einzelnen Modelle gebunden sind.

Relex bietet die vielfältigsten Möglichkeiten berechnete Daten grafisch darzustellen. Die Diagrammfunktionen bei Fault Tree+ beschränken sich auf wenige Arten, die auch nur für weitere Analysen bereit stehen.

A 3.5 Zusatzfunktionen

Alle Programme beinhalten eine Cut-Set-Analyse. Während Fault Tree+ und Relex auf die gleichen Berechnungsmethoden zurückgreifen, benutzt Cara-Fault-Tree einen speziellen Algorithmus.

Eine Einflussanalyse ist ebenfalls von allen Programmen durchführbar, während eine Unsicherheitsanalyse aber nur von Cara-Fault-Tree und Fault Tree+ bewerkstelligt werden kann. Eine Sensibilitätsanalyse ist nur mit Fault Tree+ möglich. Relex bietet dagegen noch eine Vielzahl von Analysen, die bei den anderen beiden Programmen nicht integriert worden ist.

A 3.6 Fazit

Die Hersteller der betrachteten Programme zur Durchführung von QRA zielen auf verschiedene Anwender. Während Relex versucht, möglichst viele verschiedene Funktionen zur Eintrittswahr-

scheinlichkeit von Ereignissen zu kombinieren, bieten die anderen beiden Hersteller nur Programme zur Fehlerbaumanalyse, wobei Cara-Fault-Tree verschiedene Berechnungsmethoden in den Vordergrund stellt, während Fault Tree+ ein Projekt mit verschiedenen Arbeitsstufen als Programmziel ansieht.

Daher muss zunächst genau untersucht werden, welche inhaltlichen Aspekte das gewünschte Programm besitzen soll, um für den speziellen Einsatzzweck das geeignete Programm wählen zu können.

Werden neben der Erstellung von Fehler- auch Ereignisbäume benötigt, eignen sich nur die Programme Fault Tree+ und Relex. Bei Cara-Fault-Tree können keine Ereignisbäume erstellt werden. Bei Relex ist die Anzahl der Implementierten Modelle etwas geringer als bei Fault Tree+.

Sind je nach Anwendung weitere Module notwendig, sind diese sowohl bei Relex als auch bei Fault Tree+ erhältlich, wobei bei Fault Tree+ diese Module nicht in das Projekt integrierbar sind sondern als eigenständige Programme arbeiten. Der Daten-Import erscheint dabei noch verbesserungswürdig.

A 3.7 Kosten

Hinsichtlich der Kosten fallen für Fault Tree+ ca. 8.400,- EUR an Lizenzgebühren an. Die einzelnen Module bzw. Programme kosten ungefähr 5.300,- EUR. Kombinationspreise sind möglich.

Der Anschaffungspreis für Cara-Fault-Tree beträgt ca. 4.300,- EUR.

Das untersuchte Fault-Tree/Event-Tree Modul von Relex kostet ca. 6.600,- EUR. Weitere Module sind einzeln oder in Paketen erhältlich.

A 3.8 Detaillierte Beschreibung der Funktionen der für die QRA konzipierten Programme

- Fault Tree+, Version 11 der Firma IsographDirect, Newport Beach Kanada
- Relex, Version 7.7 der Firma Relex Software, Greensburg USA
- Cara-Fault-Tree, Version 4.1 der Firma Sydvest, Trondheim Norwegen

Fault Tree+, Version 11 der Firma IsographDirect, Newport Beach Kanada

Das Programm Fault Tree+ ist eine speziell für die Durchführung von QRA entwickelte Software. In einem Projekt ist zur Erstellung von Fehler- und Ereignisbäumen eine komfortable grafische Oberfläche implementiert, die den Aufbau über drag&drop zulässt.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Es beinhaltet die folgenden drei Basismodule, die beliebig miteinander verknüpft werden können:

- Fehlerbaumanalysen
- Ereignisbaumanalysen
- Markow-Modelle

Fehlerbaumanalyse

Nach der Definition eines Top-Events wird durch Einfügen so genannter Gates der Fehlerbaum bis zu den Basisereignissen (Events) aufgebaut. Jede Gate- und Eventart hat dabei ihr eigenes grafisches Symbol. Als Gate steht die gesamte Palette der Booleschen Algebra (*or, and, vote (m/n), not, -xor, -inhibit, priority, transfer* oder *null*) zur Verfügung. Für die Basisereignisse kann zwischen den Definitionen *Basic, Conditional, Undeveloped, Dormant, House basic* und *Transfer* unterschieden werden. Grundlagen dieser Definitionen der Basisereignisse bilden Wahrscheinlichkeitsberechnungen.

Die zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeiten basieren entweder auf einem nur für dieses Event gültigen Datenmodell, einem selbst generierten Datenmodell (Generic Modelle) oder auf einem Markow Modellansatz.

Bevor Eintrittswahrscheinlichkeiten für ein Basisereignis berechnen werden können, müssen Basisdaten wie z. B. Ausfallraten, Fehlerhäufigkeiten, Inspektionsintervalle, Nichtverfügbarkeiten, Reparaturlängen und/oder Reparaturhäufigkeiten vorliegen.

Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten sind in Fault Tree+ folgende Dichtefunktionen implementiert.

- *Fixed* (Konstant, unabhängig von der Zeit)
- *Rate* (Über die Lebensdauer konstante Ausfall- und Reparaturraten)
- *MTTF* (mean time for first failure, wie *Rate*, jedoch mit Angabe der Eintritts- und Reparaturzeit)
- *Dormant* (Berücksichtigung verborgener Fehler für Notfall- und Standby Betrieb unter Angabe von Ausfallraten und Reparaturzeit und Inspektionsintervallen)
- *Sequential* (Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Nichtverfügbarkeiten von Komponenten und verborgenen Fehlern)
- *Event Tree Initiator* (Modell zur Berücksichtigung nur eines auslösenden Ereignisses mit Häufigkeitsangabe)
- *Standby* (Modell für Komponentengruppen, die sich im Standby befinden unter Angabe von Ausfall- und Reparaturraten)
- *Time at risk* (wie *Rate*, jedoch statt Reparaturrate Angabe einer Zeitperiode)
- *Binominal* (Ersetzen eines Vote-Gates durch ein Basisereignis)
- *Poisson* (Berücksichtigung irreparabler Verbrauchsteile unter Angabe der Ausfallrate und der Anzahl von Ersatzteilen)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

- *Rate/MTTR* (wie *Rate*-Modell, jedoch Angabe der Reparaturdauer statt Reparaturrate)

Darüber Hinaus existiert ein *CCF-Modell* (Common Cause Failure). Dieses Modell wird notwendig, wenn verschiedene Basisereignisse durch denselben Fehler ausgelöst werden. Dies kann z. B. eine ausgefallene Stromversorgung sein, durch die verschiedene stromabhängige Systeme gleichzeitig ausfallen. Das CCF-Modell kann eine deutliche Vereinfachung des Fehlerbaums sein, da weitere Verästelungen mit OR-Gates entfallen.

Folgende CCF-Modelle sind in Fault-Tree+ implementiert:

- *Beta Factor Modell*
- *Multiple Greek Letter (MGL) Modell*
- *Alpha Factor Modell*
- *Beta Binomial Failure Rate (BFR) Modell*

Ereignisbäume

Die Generierung von Ereignisbäumen erfolgt durch Angabe von Verzweigungspunkten im Ereignisablauf, die mit den Top-Events der Fehlerbäume verknüpft werden können.

Markow-Modelle

Markow-Modelle sind für das Einsatzgebiet (Risikoanalyse bei Tunnelbränden) jedoch weniger zweckmäßig, da die einzelnen Zustände der Fehlerbäume hier voneinander linear abhängig sind. In der Markow Analyse können Zustände auch wieder zu sich selbst führen oder starke Abhängigkeiten nicht linear hintereinander liegender Zustände beschrieben und ausgewertet werden.

Weitere Funktionen

Fault Tree+ stellt darüber hinaus zahlreichen Funktionen zur Verfügung, die weitergehende Analysen erlauben. Neben Funktionen zur Überprüfung logischer Fehler im Fehlerbaum können *House Event*-, *Minimal Cut Set*-, *Importance*- sowie *Unsicherheitsanalysen (Monte Carlo)* angewendet werden.

Einflüsse auf das Endergebnis, zum Beispiel durch Expertenbefragungen, können mit Hilfe einer Sensibilitätsanalyse untersucht werden. Die Sensibilitätsanalyse erlaubt eine automatische Veränderung der Event-Ausfall und Reparaturdaten innerhalb eines Intervalls.

Relex 7.7 der Firma Relex Software, Greensburg USA

Relex 7.7 ist für die Erstellung von QRA entwickelt worden. Neben Fehlerbäumen und Ereignisbäumen kann ein Projekt auch noch *Markow-Analysen*, *Reliability Block-Diagramme*, *FMEA* (Failure Mode and Effect Analysis) und *Weibull-Analysen* beinhalten. Die Fehlerbaumanalyse wird hier in Kombination mit anderen Zuverlässigkeitsanalysen betrachtet. Die Analysen werden

von einzelnen Modulen durchgeführt. Diese Module können unabhängig voneinander bezogen werden.

Fehlerbaumanalyse

Bei der Einrichtung des Projektes muss angegeben werden, welche Analysen und Informationen (aus ggf. weiteren Modulen) verwandt werden sollen. Die Eingabe erfolgt übersichtlich in mehreren Fenstern per drag&drop.

Nach der Definition eines Top-Events werden durch Einfügen von Gates und Events (Basisereignisse) aus Listen die Fehlerbäume aufgebaut. Die grafische Eingabe wird gleichzeitig in einer tabellarischen Form mit logischen Verknüpfungen dargestellt. Folgende Gates sind dabei möglich: *AND, OR, Voting (m/n), Exclusive OR (XOR), Priority AND, Inhibit, NOT, NOR, NAND, Transfer, Remarks, Pass-through, Functional Dependency, Sequence-Enforcing* und *Spare*. Bei den Basisereignissen kann zwischen *Basic-, Spare-, House- oder Undeveloped Event* ausgewählt werden.

Besonders hervorzuheben ist, dass jede Gate- und Eventart ihr eigenes grafisches Symbol hat und die Farben der Gates und Events farblich angepasst werden können. Ein Event, das an mehreren Stellen gleichzeitig auftritt und somit zwangsläufig simultan erfolgt, kann ebenfalls hervorgehoben werden. Im Programm werden solche Events als „Repeated Event“ bezeichnet.

In der Parameter Definition wird die Quelle der Berechnungsart für das Event festgelegt. Es gibt vier Möglichkeiten, aus denen man wählen kann: *Benutzerdefiniert, CCF Groups* (Common cause failure, siehe Fault Tree+), *Event Parameter* (Liste mit schon erarbeiteten Events) oder verbunden zu Daten aus *FMEA* und *Markow-Analyse*.

Um eine benutzerdefinierte Berechnung durchzuführen, stehen die folgenden frei kombinierbaren Parameter zur Verfügung:

- Angabe einer *konstanten* Wahrscheinlichkeit (zeitunabhängig)
- *Modell zur Fehlerrate*
- *MTBF* (Mean Time Between Failures – berücksichtigt das Zeitintervall zwischen Fehlern)
- *Frequenz Modell* (Häufigkeit pro Stunde als Eingangswert)
- *Reparaturintervall-Modell*
- *Inspektionsintervall-Modell*

Für Repeated Events ist eine zusätzliche Angabe der *Coverage Percentage* erforderlich. Hiermit kann eine Auskunft, wie hoch der Prozentsatz ist, in dem der Fehler unbemerkt bleibt, festgelegt werden.

Das Berechnungsverfahren zur Analyse der Fehlerbäume richtet sich nach Ziel und Art des Systems. In der *Minimal Cut Set* Analyse wird die kleinste Gruppe an Events ermittelt, die im Zusammenhang einen Systemfehler auslösen. Weiterhin können Berechnungen zur Nichtverfügbarkeit, der Zuverlässigkeit, der Fehlerhäufigkeit und der Fehleranzahl durchgeführt werden.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Die Berechnungen für Einflussanalysen können nach *Fussell-Vesely*, *Birnbaum* oder einem „kritischen Modell“ als Maßeinheit angegeben werden. Weitere Berechnungsmethoden sind die *Exact-Methode* (streng nach Boolescher Algebra ohne Cut Sets), *Cut Set Summation* (Wahrscheinlichkeit aus Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Cut Sets), *Cross Product Methode* (Nichtverfügbarkeitsberechnung nach Poincare) und die *Esary Proschan Methode* (Nichtverfügbarkeitsermittlung).

Die Ergebnisdarstellung erfolgt anschaulich entweder über vorgefertigte Graphen oder über benutzerdefinierte Bilder.

Ereignisbäume

Die Generierung von Ereignisbäumen erfolgt durch Angabe von Verzweigungspunkten im Ereignisablauf, die mit den Top-Events der Fehlerbäume verknüpft werden können. Das Verfahren ist dabei menügesteuert.

Weitere Funktionen

Relex 7.7 besitzt eine Makro- Funktion, mit der sich oft wiederholende Arbeitsschritte zeitlich verkürzt werden können. Als Sprache wurde VBA (Visual basic for Applications) gewählt.

Die weiteren im Folgenden vorgestellten Funktionen sind in Modulen vorhanden, die zusätzlich zum Grundmodul erworben werden müssen

Die Zuverlässigkeits-Vorhersage-Analyse (*Reliability Prediction Analysis*) besitzt mehrere Modelle, die die Fehlerrate aufgrund von Komponentendaten und -parametern errechnet werden. Die Parameter beziehen sich z. B. auf das Einsatzgebiet, Temperaturen, Qualität oder Spannungen.

Die Daten der einzelnen Komponenten können selbst ermittelt oder importiert werden. Die Verwendung einer Datenbank ist dazu zu empfehlen

Eine besondere Funktion ist das *RBD* (Reliability Block Diagramm). Viele Hardware/Software-Systeme sind in ihrer Konfiguration sehr komplex. Gleichungen für die Zuverlässigkeit solcher Systeme benötigen oft sehr anspruchsvolle mathematische Algorithmen. Mit der *RBD* Funktion importiert man Graphiken entsprechend den einzelnen Systemteilen (Blocks). Diese werden logisch auf dem Bildschirm verknüpft und mit ihren Eigenschaften versehen. Es können *Zuverlässigkeiten*, *Nichtverfügbarkeiten* und *Mean Time Between Failures* berechnet werden. Die Rechnungen werden per Monte-Carlo Simulation erledigt. Ein weiterer Vorteil ist die optische Erschließung des Systems für den Anwender. Als Datenquelle kann der SystemTree bzw. der Parts table dienen.

Das Relex *Systemoptimierungs* und *Simulations Modul (OpSim)* beschäftigt sich hauptsächlich mit der Wartung von Systemen. Es sind drei verschiedene Wartungszustände möglich: Korrigierend (reagierend), präventiv und Inspektion. Mittels *RBD* kann ein Wartungssystem optisch

umgesetzt werden. Außerdem kann angegeben werden, wann welches Wartungs-/Reparaturteam einzusetzen ist, wie oft man es braucht und wie teuer ein Einsatz ist. Hieraus lassen sich auch die Gesamtkosten berechnen.

Die *FMEA* (Failure Mode and Effect Analysis) ist ein Werkzeug, um eine Analyse und eine Verbesserung der Produkt-Zuverlässigkeit durchzuführen. Es wird definiert, was und wie versagen kann. Zusätzlich wird verdeutlicht, welcher Fehler welche Konsequenzen für das System haben kann. FMEA beinhaltet auch die Möglichkeit, eine „Criticality“-Analyse durchzuführen, bei der die kritischen Fehler für das System erkannt werden. In diesem Modul sind verschiedene FMEAs integriert, die teilweise aus dem militärischen Umfeld oder der Automobilindustrie abgeleitet sind, um anwendergerecht zu arbeiten. Der Hauptunterschied zwischen FMEA und einer Fehlerbaumanalyse ist die Orientierung. Der Fehlerbaum ist konkret auf ein Topevent zugeschnitten, während die FMEA eher die Gesamtheit untersucht: So bestehen bei der FMEA auch nicht die Abhängigkeiten zwischen Events und Gates. Es gibt die Möglichkeit, nach einer FMEA direkt eine Fehlerbaumanalyse durchzuführen. Die gefundenen Fehlerarten stellen Basic-events dar, die mit OR-Gates verknüpft werden. Das Top Event ist als eines der End effects der FMEA wählbar.

Die *Weibull Verteilung* ist eine der meist angewendeten Verteilungen zur Analyse von Fehlerdaten. Sie kann benutzt werden, um mechanische, chemische, elektrische, elektronische, materialbezogene und menschliche Fehler zu analysieren. Sie ist effektiv, um Situationen mit steigender, konstanter oder abfallender Fehlerrate zu überprüfen. Der Hauptvorteil der Weibull-Analyse besteht in recht genauen Ergebnissen, die aus einer sehr kleinen Datenmenge resultieren. Bei Relex 7.7 werden in der Weibull-Analyse eine Reihe von Fehlerverteilungen unterstützt, wie: *normal, lognormal, Gumbel, Weibull* und *Weibull-Variationen* (Exponential, Rayleigh und Weibayes).

In der *Maintainability Prediction-Analyse* (frei: Wartungs-Vorhersage-Analyse) wird eine Aussage über die Notwendigkeit der Wartung oder auch der Reparatur getroffen.

Ein weiteres integriertes Modul ist die *Life Cycle Cost (LCC) Analyse*. Das Ziel der LCC ist die Kostenermittlung eines Systems über seine Lebensdauer. Damit bietet sich die Möglichkeit verschiedene Alternativen zu vergleichen. Auf diese Art lässt sich schnell herausfinden, wie effektiv sich Veränderungen auf die Kosten ausdrücken.

Cara-Fault-Tree 4.1 der Firma Sydvest, Trondheim Norwegen

Cara Fault Tree ist ausschließlich für die grafische Herstellung und Analyse von Fehlerbäumen von der Firma Sydvest Software konzipiert worden. Die Grenzen des Programms sind durch folgende Parameter gekennzeichnet:

50 Symbole pro Seite, 12 Eingaben pro Gate, 200 Fehlerbaumseiten, 1000 Gates, 1000 Events, 5500 Cut Sets, 32000 Events verteilt auf alle Cut Sets

Fehlerbaumanalyse

Die Erstellung der Fehlerbäume ist wie bei den anderen beiden Programmen grafisch möglich. Die möglichen Events sind: *Basic*, *Undeveloped*, *House* oder *Transfer*. Jedes unterschiedliche Gate oder Event hat sein eigenes grafisches Symbol. Innerhalb der Fehlerbäume ist über eine Zoomfunktion ein guter Überblick möglich.

Eine Fehlerbaumanalyse erfolgt in Cara-Fault-Tree in der folgenden Reihenfolge:

- Fehlersuche (wird immer durchgeführt)
- Cut Set Analyse
- Qualitative Analyse
- Quantitative Analyse

Bevor eine Fehlerbaumanalyse erfolgt, wird das System auf logische Fehler untersucht. Auch wenn eine Analyse möglich ist, aber z. B. Daten zu Events nicht vorhanden sind, wird dies dem Anwender gezeigt. So wird der Fehlerbaum auf verschiedene Eingabefehler hin untersucht.

Es gibt zwei verschiedene Modi, eine Analyse durchzuführen, die Standard Version oder die Experten Analyse. Im Standard Modus muss eine Vielzahl von Werten nicht angegeben werden und erleichtert eine schnelle Durchführung einer Analyse. Für die exaktere Cut-Set-Analyse, bei der die geringste Menge zeitlich auftretender Fehler, die zum Eintritt des Systemfehlers führen, ermittelt werden soll, steht ein besonderer Algorithmus zur Verfügung.

Wenn eine qualitative Analyse gewünscht wird, so wird bei den Basis-Events unterschieden, aus welcher Quelle der Fehler kommt. Es können menschliche Fehler, Fehler aus aktivem oder aus passivem Equipment sein. Diese Unterscheidung wird getroffen, da menschliche Fehlentscheidungen häufiger auftreten als maschinelle Fehler. Aktive Geräte dagegen sind fehleranfälliger als passive. Diese Spezifikation wird auch von der Cut-Set-Analyse übernommen. Es folgt, dass ein Cut-Set aus einem menschlichen Versagen als kritischer eingeschätzt wird als aus einem maschinellen Fehler.

Um eine quantitative Analyse durchzuführen, müssen eine die folgenden Parameter eingegeben werden.

- Häufigkeit (Auftrittshäufigkeit innerhalb eines Zeitintervalls)
- Wahrscheinlichkeit infolge Anforderung (on demand probability – für Komponenten, die im Normalbetrieb nicht aktiv sind)
- Testintervall (bei regelmäßigen Tests Fehlerrate, Testdauer und Reparaturzeit einer Systemkomponente)
- Reparierbare bzw. austauschbare Einheiten (Angabe von Fehlerrate und Reparaturzeit)
- Nicht reparierbare bzw. austauschbare Einheiten (Angabe der Fehlerrate)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Die möglichen quantitativen Analysen sind:

- Die Wahrscheinlichkeit mit der das Top Event zu einem bestimmten Zeitpunkt eintritt
- Die Wahrscheinlichkeit mit der das Top Event in einem Zeitintervall nicht eintritt
- Die Zeit bis zu einem ersten System Fehler (MTTF)
- Die Häufigkeit mit der das Top Event eintritt
- Die Verteilung der Häufigkeit des Top Events
- Die Anzahl der Fehler in einem Zeitintervall
- Die durchschnittliche Systemverfügbarkeit innerhalb eines Zeitintervalls

Um die Wahrscheinlichkeit, mit der das Top Event zu einem bestimmten Zeitpunkt eintritt, zu berechnen, müssen von jeder Komponente des Fehlerbaums Daten für diesen Zeitpunkt vorliegen.

Im Gegensatz zur vorangegangenen Wahrscheinlichkeitsberechnung ist das Zeitintervall für die Wahrscheinlichkeit, mit der das Top Event in einem Zeitintervall nicht eintritt, von zentraler Bedeutung. Diese Berechnung ist sinnlos, wenn das gesamte Cut-Set nur aus Wahrscheinlichkeiten infolge Aufforderung besteht, da hier nur ein bestimmter Zeitpunkt untersucht wird. Ebenso nicht durchführbar ist die Berechnung für ein Cut-Set aus Testintervallen. Offensichtlich wird dies, wenn ein Top Event mit einem AND-Gate zwei Basisereignisse verbunden hat. Da das Programm keine gleichzeitig durchgeführten Testintervalle berücksichtigen kann, wäre die Wahrscheinlichkeit, dass beide Events zusammen auftreten, gleich Null. Dieselben Einschränkungen gelten auch für die MTTF Berechnung.

Die Häufigkeit, mit der das Top Event eintritt, wird als Häufigkeit verteilt auf das untersuchte Zeitintervall betrachtet. Sobald die Zeit zwischen dem Auftreten des Top Events exponential verteilt ist, wird die Häufigkeit, mit der das Top Event auftritt, über die Poisson Verteilung bestimmt.

Um die Berechnungen für die quantitativen Analysen durchführen zu können stehen verschiedene Berechnungsmethoden bereit:

- *Exact* (Erac) /Upper bound Approximation
- *Monte Carlo* Simulation
- *Numerische Integration*
- *Handrechenarten*

Mit der Monte Carlo Simulation sind alle Analysen berechenbar. Die Exact/Upperbound-Methode ist nur zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Top Events zu einem bestimmten Zeitpunkt möglich. Mit der numerischen Integration kann eine Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der das Top Event innerhalb eines Zeitintervalls nicht eintritt, die MTTF, die Häufigkeit des Top Events und Anzahl der Fehler erfolgen. Durch die Handrechenarten wird ebenfalls die Häufigkeit des Top Events und die Anzahl der Fehler berechnet.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Während die Upper Bound Approximation deutlich schneller arbeitet, ist der Erac-Algorithmus deutlich genauer (exact).

Ereignisbäume

Eine Funktion zur Erstellung von Ereignisbäumen steht bei Cara-Fault-Tree nicht zur Verfügung.

Weitere Funktionen

Mittels einer *modularen Dekomposition* (Zerlegung in alle Einzelteile) werden die Rechenzeiten beschleunigt. Zuerst wird ein Fehlerbaum auf so genannte „Super-Module“ untersucht. Das Super-Modul ist ein Subfehlerbaum, der aus Events besteht, die im gesamten Fehlerbaum einmalig sind. Innerhalb des Fehlerbaums wird dieses Super-Modul wie ein Event behandelt.

Durch die Anwendung von Approximationsmethoden wird die Genauigkeit des Ergebnisses gesteigert, da die Berechnung der Super-Module exakt ist. Außerdem wird die Suche des minimalen Cut-Sets beschleunigt. Der Nachteil bei der Bestimmung des minimalen Cut-Sets in Verbindung mit der modularen Dekomposition ist, dass das Super-Modul nur als ein Basisevent erkannt wird.

Beim Einsatz des *Erac-Algorithmus* können die systembedingte Einschränkung auf 64 Events umgangen werden, indem mehrere Events zu einem Super-Modul zusammengefasst werden. Dadurch wird die Kapazität der Berechnung gesteigert.

Weiterhin bietet Cara-Fault-Tree *Einfluss-Analysen*. Wenn der Einfluss auf die Zuverlässigkeit im Vordergrund steht, können entweder Analysen nach *Vesely-Fussell* oder nach *Birnbaum* angewandt werden.

Steht die Struktur im Mittelpunkt, folgt die Analyse wiederum Formeln nach *Birnbaum*, genau wie eine Überprüfung des kritischen Einflusses und eine Analyse des möglichen Potentials zur Verbesserung. Schließlich ist noch eine Analyse über den Einfluss der Cut-Sets möglich. Darüber hinaus ist in Cara-Fault-Tree eine Unsicherheitsanalyse implementiert.

Begriffe

Begriff	Beschreibung
MTTF	<p><u>Mean Time to Failure (Zeit bis zum ersten Fehler)</u></p> <p>"Mean Time To Failure" ist die erwartete Zeit bis zum ersten Fehler eines Teils im Gerät. Es ist ein statistischer Wert und wird über eine lange Zeitperiode und mit einer großen Anzahl von Einheiten betrachtet. Bei konstanten Fehlerratesystemen, ist der MTTF Wert die Umkehrung der Fehlerrate. Wenn die Fehlerrate in Fehlern/Millionen Stunden angegeben ist; $MTTF = 1,000,000/\text{Fehlerrate}$ für Komponenten mit einer exponentiellen Verteilung. Technisch gesehen, sollte MTBF nur in Verbindung mit reparierbaren Geräten verwendet werden, während MTTF für nicht reparierbare Geräte benutzt werden sollte. MTBF wird normalerweise jedoch sowohl für reparierbare als auch für nicht reparierbare Geräte benutzt.</p>

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Begriff	Beschreibung
MTBF	<p><u>Mean Time Between Failures (Zeit zwischen den Fehlern)</u></p> <p>"Mean Time Between Failures" ist die erwartete Zeit zwischen den Fehlern und wird in Stunden gemessen. Es ist ein statistischer Wert und wird über eine lange Zeitperiode und mit einer großen Anzahl von Einheiten betrachtet. Bei konstanten Fehlerratesystemen, ist der MTBF Wert die Umkehrung der Fehlerrate. Wenn die Fehlerrate in Fehler/Millionen Stunden angegeben ist; $MTBF = 1,000,000/\text{Fehlerrate}$ für Komponenten mit einer exponentiellen Verteilung. Technisch gesehen, sollte MTBF nur in Verbindung mit reparierbaren Geräten verwendet werden, während MTTF für nicht reparierbare Geräte benutzt werden sollte. MTBF wird normalerweise jedoch sowohl für reparierbare als auch für nicht reparierbare Geräte benutzt.</p>
MTTR	<p><u>Mean Time to Repair (Zeit benötigt für die Reparatur)</u></p> <p>MTTR, oder "Mean Time to Repair", ist die gesamte Zeit, die für die Ausführung aller Instandhaltungsreparaturen benötigt wird, dividiert durch die gesamte Anzahl dieser Reparaturen.</p>
Fault Tree Analysis	<p><u>Fehlerbaumanalyse</u></p> <p>Eine Fehlerbaumanalyse ist eine deduktive, von oben nach unten strukturierte Methode, um das Systemdesign und die Systemperformance zu analysieren. Es fängt an mit der Festlegung eines zu analysierenden Top-Ereignisses, wie z. B. ein Feuer, gefolgt von der Identifizierung aller zugehörigen Elemente in einem System, die dieses Top-Ereignis auslösen könnten. Fehlerbaumanalysen werden normalerweise graphisch ausgeführt, mit einer logischen Struktur von AND und OR Gates. Manchmal müssen bestimmte Elemente oder Basisereignisse zusammen auftreten, um das Top-Ereignis auszulösen. In diesem Fall werden die Ereignisse unter einem AND Gate angeordnet, was bedeutet, dass alle Basisereignisse eintreffen müssten, um das Top-Ereignis auszulösen. Wenn die Basis Ereignisse alleine das Top-Ereignis auslösen können, würden sie unter einem OR Gate angeordnet werden. Es wird das gesamte System sowie auch menschliche Eingriffe analysiert, wenn man eine Fehlerbaumanalyse ausführt.</p>
FMEA	<p><u>Failure Mode and Effects Analysis (Fehler-Möglichkeiten und Ereignis-Analyse)</u></p> <p>Das Kürzel FMEA steht für Fehler-Möglichkeiten- und Ereignis Analyse. Die FMEA ist eine induktive von unten nach oben strukturierte Methode, um das Systemdesign und die Systemperformance zu analysieren. Es gibt jedoch viele Aspekte zur FMEA. Im Mittelpunkt der Analyse steht die Bestimmung der Effekte, die die verschiedenen Fehlerarten in einem System haben können. Verschiedene Standards wie z. B. SAE J1739, AIAG Potential Failure Mode and Effects Analysis, sowie auch Dokumente von Ford, DaimlerChrysler und GM liefern die Instruktionen und Formate für die Ausführung von FMEAs.</p>
Event Tree	<p><u>Ereignisbaum</u></p> <p>Ein Ereignisbaum ist eine Methode ein System zu analysieren, um das Risiko der verschiedenen Fehler zu bestimmen und um die ausschlaggebenden Ereignisse zu benennen. Ereignisbäume werden graphisch als eine Abfolge von Ereignissen dargestellt, wobei jede Abfolge von dem Erfolg oder Misserfolg der verschiedenen einzelnen Ereignisse abhängt. Die Ergebnisse einer Ereignisbaumanalyse enthalten die Wahrscheinlichkeiten von jedem Zweig des Ereignisbaums.</p>

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Begriff	Beschreibung
Reliability Analysis	<p><u>Zuverlässigkeitsvorhersage Analyse</u></p> <p>Reliability Engineering ist die Analyse der vermuteten oder tatsächlichen Zuverlässigkeit eines Produktes, Prozesses oder eines Services und das Identifizieren von Maßnahmen, um Fehler zu reduzieren oder ihren Einfluss zu minimieren. Ingenieure, die Zuverlässigkeiten analysieren, führen normalerweise Zuverlässigkeitsvorhersagen, FMEA oder FMECA, Entwicklung von Testprogrammen, Überwachung und Analysen von realen Ausfalldaten durch und schlagen Design oder Produktionsänderungen vor. Reliability Engineering wird von Zuverlässigkeits-, Design-, Qualitäts- oder System-Ingenieuren gemacht. Das Ziel von Reliability Engineering ist es, ihr Produkt zuverlässiger zu machen, um Reparaturen zu reduzieren, Kosten zu senken und um den Ruf Ihrer Firma zu wahren. Um dieses Ziel am besten zu erreichen, sollte Reliability Engineering auf allen Ebenen von der Entwicklung bis zur Produktion mit allen Beteiligten Ingenieuren angewendet werden.</p>
LCC	<p><u>Life Cycle Cost - Lebens-Zyklus-Kosten-Analyse</u></p> <p>Eine Lebens-Zyklus-Kosten-Analyse ist eine Methode, die Kosten eines Systems über seine gesamte Lebenszeit hinweg zu berechnen. Die Analyse eines typischen Systems könnte Kosten wie z. B. Systemplanung und Designkonzeption, vorausgehende Systemdesignkosten, Design- und Entwicklungskosten, Produktionskosten, Instandhaltungskosten und Entsorgungskosten enthalten. Diese Art von Analyse benutzt oft Werte von anderen Zuverlässigkeitsanalysen wie z. B. die Fehlerrate, die Kosten der Ersatzteile, Reparaturzeit und die Kosten der Komponenten. Eine Firma kann eine Lebens-Zyklus-Kosten-Analyse benutzen, um zum Beispiel die Garantiekosten zu bestimmen. Viele Firmen sind der Meinung, daß eine Lebens-Zyklus-Kosten-Analyse ein wertvolles Werkzeug ist um während der Designphase eines Projekts, die kosteneffektivste Lösung zu finden, bevor substanzielle Kosten auftreten.</p>

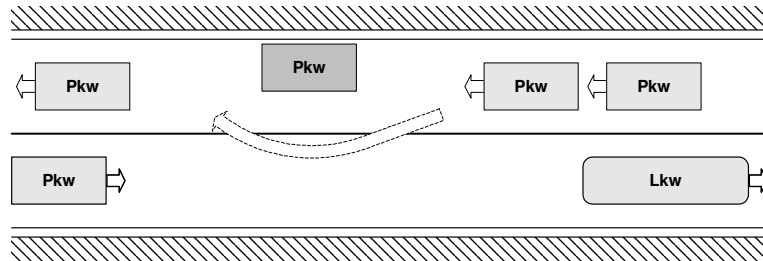
Anhang 4 Ereignisszenarien

Die nachfolgende Zusammenstellung soll eine Übersicht über die maßgeblich möglichen Arten/Typen von möglichen Ereignisszenarien in Straßentunneln geben. Die Zusammenstellung hat primär illustrativen Charakter und soll dem Leser qualitativ das Spektrum möglicher Ereignisszenarien anhand exemplarischer Beschreibungen aufzeigen. Die Beschreibungen der Ereignisszenarien werden wie folgt gegliedert:

- *Kurzbeschreibung:* Kurzbeschreibung des Ereignisszenarios und Auflistung möglicher Ursachen. Wie könnte ein solches Ereignisszenario ablaufen?
- *Mögliche Situationen:* Für jeden Szenariotyp sind verschiedene Ausprägungen möglich. Um das Spektrum der möglichen Ereignisabläufe aufzuzeigen werden verschiedene Ablaufmöglichkeiten zu jedem Szenariotyp beschrieben.
- *Mögliche erschwerende Begleitumstände:* Beschreibung von Begleitumständen, welche unter ungünstigen Umständen zu einer Verschärfung der Situation führen können wie beispielsweise eine Erhöhung des Schadenausmaßes.
- *Mögliche Folgeereignisse:* Beschreibung von möglichen Folgen, welche sich aus dem Szenario ergeben können.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln**Szenariotyp „Panne“****Kurzbeschreibung**

Ein Fahrzeug kommt in Folge einer Panne im Tunnel zum Stehen. Das defekte Fahrzeug hält an und behindert so den Verkehr auf der betroffenen Spur. Es kommt jedoch zu keinem Brand und zu keiner Kollision des defekten Fahrzeuges mit anderen Fahrzeugen.



Mögliche Ursachen: Motordefekt, Benzinmangel, Platzen eines Reifens usw.

Mögliche Situationen

- *Situation 1: Fahrzeug-Panne im Portalbereich*
Ein Fahrzeug bleibt infolge einer Panne im Bereich eines Tunnelportals stehen. Eine der Fahrspuren wird dadurch blockiert, die andere bleibt jedoch weiterhin für den übrigen Verkehr befahrbar. Hinter dem Fahrzeug, das nach kurzer Zeit aus dem Tunnel abgeschleppt werden kann, bildet sich kurzzeitig ein Stau.
- *Situation 2: Fahrzeug-Panne im Tunnel (1 Fahrspur blockiert)*
Ein Fahrzeug bleibt infolge einer Panne im Tunnel stehen. Hinter dem defekten Fahrzeug bildet sich ein Stau, sofern es dem Verkehrsteilnehmer des Pannenfahrzeuges nicht gelingt, das Fahrzeug noch aus dem Tunnel zu bringen. Die betroffene Fahrspur bleibt längere Zeit blockiert.
- *Situation 3: Beide Fahrspuren infolge einer Panne blockiert*
Ein Personenwagen mit einem Anhänger oder ein Lastwagen bzw. Bus bleibt infolge eines geplatzten Reifens so stehen, dass er beide Fahrbahnen blockiert. Der Verkehr wird erheblich behindert, da ein Überholen kaum möglich ist und zudem dabei die Gefahr von Frontal- oder Auffahrkollisionen besteht. Die Bergung des Pannenfahrzeuges wird durch den Stau erschwert.

Mögliche erschwerende Begleitumstände

- Erhöhtes Verkehrsaufkommen in beiden Fahrtrichtungen → Staubildung; evtl. Auswirkungen auf den Verkehrsfluss im Bereich der Tunnelportale
- Mehrere Personen verlassen ihre Fahrzeuge → Gefahr, dass Personen angefahren werden.

Mögliche Folgeereignisse

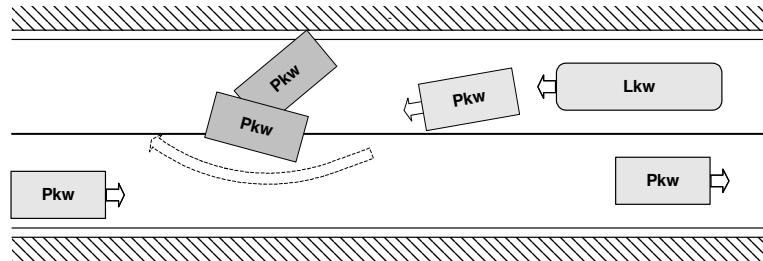
- Auffahrkollision hinter dem Pannenfahrzeug (Ereignisszenario „Kollision“)
- Frontal-, Streif-, oder Auffahrkollision bei Spurwechsel (Ereignisszenario „Kollision“)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Szenariotyp „Kollision“

Kurzbeschreibung

Ein oder mehrere Fahrzeuge sind in eine Kollision im Tunnel verwickelt. Je nach Umständen kollidiert das Fahrzeug mit der Tunnelwand (Selbstunfall) oder mit anderen Fahrzeugen (Streif-, Auffahr-, oder Frontalkollision). In ungünstigen Fällen wird durch die Kollision der Verkehr auf beiden Fahrspuren behindert. Es kommt jedoch nicht zu einem Brand der Fahrzeuge.



Mögliche Ursachen: Überhöhte Geschwindigkeit, Bremsversagen, Übermüdung, Unachtsamkeit, Geisterfahrer usw.

Mögliche Situationen

- Situation 1: Kollision eines Fahrzeuges mit der Tunnelwand**
Ein Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und kollidiert mit der Tunnelwand. Das defekte Fahrzeug blockiert den Verkehr auf einer Fahrspur. Hinter dem Fahrzeug bildet sich kurzzeitig ein Stau. Je nach Ort des Unfalls (Bereich Vorsortierstrecken, Innenbereich Tunnel), kann u. U. mittels geeigneter Lenkungsmaßnahmen (Sperrern der betroffenen Fahrspur) der Verkehrsfluss mit Einschränkungen weitgehend aufrechterhalten werden.
- Situation 2: Auffahrkollision**
Ein Fahrzeug kollidiert wegen ungenügenden Abstands mit einem voraus fahrenden Fahrzeug, das abrupt abbremst. Es kommt zu einer Auffahrkollision und zu einer Blockierung einer oder mehrerer Fahrspuren. Je nach Ort des Unfalls (Bereich Vorsortierstrecken, Innenbereich Tunnel), kann u. U. mittels geeigneter Lenkungsmaßnahmen (Sperrern der betroffenen Fahrspur) der Verkehrsfluss mit Einschränkungen weitgehend aufrechterhalten werden.
- Situation 3: Streif- oder Frontalkollision**
Ein Fahrzeug kommt bei der Fahrt durch den Tunnel auf die falsche Fahrspur und streift ein entgegenkommendes Fahrzeug oder kollidiert mit diesem. Der Verkehr kommt infolge der blockierten Fahrspuren und herum liegender Trümmerteile zum Erliegen. Es bildet sich ein Stau in beiden Fahrtrichtungen, der die Intervention der Ereignis- und Rettungsdienste erschwert.
- Situation 4: Massenkollision**
Nach einem Auffahrunfall können mehrere Lenker der nachfolgenden Fahrzeuge nicht mehr rechtzeitig bremsen, so dass es zu einer Massenkollision kommt. Alle Fahrspuren sind blockiert der Verkehr kommt zum Erliegen. Zahlreiche Fahrzeuginsassen steigen aus ihren Fahrzeugen und verlassen den Tunnel zu Fuß.
- Situation 5: Kollision eines Lkw mit Ladungsverlust**
Ein Lkw mit Anhänger kollidiert mit der Tunnelwand. Dabei stürzt der Anhänger um und die darauf befindliche Ladung (z. B. Zeitungspapierrollen) fällt herunter und verteilt sich über die gesamte Fahrbahn. Teile der Ladung rollen in Richtung Portal. Einige unmittelbar nachfolgende Fahrzeuge können nicht mehr rechtzeitig bremsen und kollidieren mit den Ladungsteilen. Es bildet sich in beiden Fahrtrichtungen ein Stau, der Verkehr kommt zum Erliegen. Die Bergung des Lkw-Anhängers und der verlorenen Ladung wird dadurch behindert.

Szenariotyp „Kollision“**Mögliche erschwerende Begleitumstände**

- Erhöhtes Verkehrsaufkommen in beiden Fahrtrichtungen → Staubildung; evtl. Auswirkungen auf den Verkehrsfluss im Bereich der Tunnelportale
- Mehrere Personen verlassen ihre Fahrzeuge → Gefahr, dass Personen angefahren werden.
- Ein oder mehrere vollbesetzte Reisebusse in Szenario involviert
- Einige Verkehrsteilnehmer sind in Fahrzeugen eingeklemmt und können sich nicht selbst befreien.

Mögliche Folgeereignisse

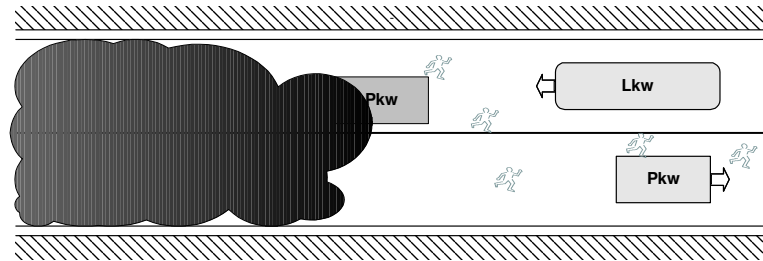
- Auslaufen von Treibstoff und Gefahr einer nachfolgenden Entzündung (Ereignisszenario „Brand“)
- Weitere Auffahrunfälle im Bereich des Stauendes
- Frontal-, Streif-, oder Auffahrkollision bei Spurwechsel (Ereignisszenario „Kollision“)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Szenariotyp „Brand“

Kurzbeschreibung

Ein Fahrzeug gerät wegen eines technischen Defektes oder als Folge einer Kollision in Brand. In günstigen Fällen können beteiligte Verkehrsteilnehmer oder Interventionsdienste das Feuer rasch löschen. In ungünstigen Fällen weitet sich der Brand aus und greift auf andere Fahrzeuge über. Als Folge des Brandes entwickeln sich rasch toxische Rauchgase.



Mögliche Ursachen: Motorbrand durch Überhitzung oder Kurzschluss, Kollision, usw.

Mögliche Situationen

- Situation 1: Motorbrand eines Pkw*
Ein Personenwagen kommt mit brennendem Motor zu Stehen. Der Brand wird von den Fahrzeuginsassen mit einem Handfeuerlöscher rasch gelöscht. Infolge der Rauchbildung und der Blockierung einer Fahrspur kommt es zu einer geringfügigen Behinderung des Verkehrs (vgl. Ereignisszenario „Panne“).
- Situation 2: Fahrzeugbrand (Brandleistung 5 - 10 MW)*
Ein brennendes Fahrzeug bleibt nach einem Motorbrand im Tunnel stehen. Es gelingt den Fahrzeuginsassen nicht das Feuer unter Kontrolle zu bringen und den Brand zu löschen. Nach wenigen Minuten ist das Fahrzeug in Vollbrand geraten. Der entstehende toxische Rauch breitet sich rasch aus. Mehrere Verkehrsteilnehmer in unmittelbarer Nähe des Unfalls erkennen die Situation rasch und können den Tunnel rechtzeitig über die Notausgänge verlassen. Zahlreiche Verkehrsteilnehmer im Tunnel verlassen ihre Fahrzeuge und flüchten zu Fuß. Der Brand wird schließlich von der Feuerwehr gelöscht. Für die Lösch- und Räumungsarbeiten muss der Tunnel für einige Stunden gesperrt werden.
- Situation 3: Brand mehrerer Pkw (Brandleistung 20 - 30 MW)*
Kurz nach einer Kollision von 2 Pkw geraten die beiden Unfallfahrzeuge in Brand. Nicht alle Fahrzeuginsassen können die Fahrzeuge rechtzeitig verlassen. Durch den Brand entstehenden Rauchgase breiten sich rasch über den gesamten Tunnelquerschnitt aus. Verkehrsteilnehmer in unmittelbarer Nähe des Unfalls erkennen die Situation rasch, verlassen ihre Fahrzeuge und flüchten zu Fuß. Der Brand kann erst nach einigen Stunden unter Kontrolle gebracht und gelöscht werden. Es entstehen einige Schäden an der Tunnelinfrastruktur.
- Situation 3: Grossbrand (Brandleistung >30 MW)*
Ein Lkw gerät z. B. infolge eines technischen Defekts in Vollbrand. Das Feuer breitet sich rasch aus und greift auf andere Fahrzeuge über. Es entstehen dichte, giftige Rauchgase, deren Ausbreitung durch das Lüftungssystem nicht kontrolliert werden kann. Zahlreiche Tunnelbenutzer versuchen zu Fuß zu fliehen. Der Brand kann erst nach mehreren Stunden unter Kontrolle gebracht und danach gelöscht werden. Es entstehen erhebliche Schäden an der Tunnelinfrastruktur.

Mögliche erschwerende Begleitumstände

- Erhöhtes Verkehrsaufkommen in beiden Fahrrichtungen → rasche Staubildung
- Bei Tunneln mit größerer Längsneigung kann aufgrund der thermischen Ausbreitung der Rauchgase („Kamineffekt“) nach kurzer Zeit ein großer Teil des Tunnels verraucht sein.
- Fahrzeuginsassen können ihre Fahrzeuge nicht verlassen
- Ein oder mehrere vollbesetzte Reisebusse in Szenario involviert
- Bei einem Brand als Folge einer Kollision kann die Zugänglichkeit zum Unfallort stark eingeschränkt sein.
- Ausfall des Lüftungssystems

Szenariotyp „Brand“**Mögliche Folgeereignisse**

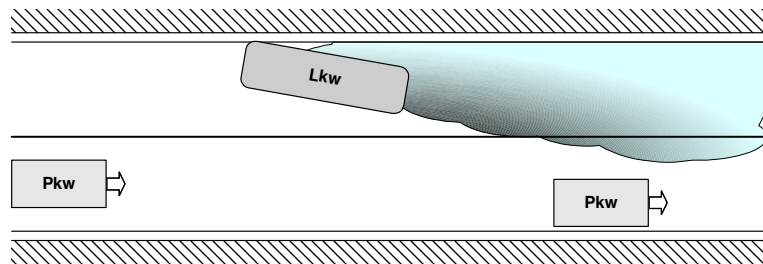
- Übergreifen des Brandes auf andere Fahrzeuge
- Kollisionen bei Wendemanövern im Tunnel
- Defekte an der Tunnelinfrastruktur (z. B. Ausfall des Lüftungssystems usw.)
- Gefahr durch abplatzende Betonelemente

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Szenariotyp „Freisetzung von Gefahrgut“

Kurzbeschreibung

Ein mit Gefahrgut beladener Lkw kollidiert mit der Tunnelwand. Das Fahrzeug wird dabei so stark beschädigt, dass das mitgeführte Gefahrgut freigesetzt wird und sich im Fahrraum verteilt.



Mögliche Ursachen: Kollision, Leck.

Mögliche Situationen

- Situation 1: Freisetzung von festen Gefahrgütern**
 Ein Lkw, der feste Gefahrgüter (z. B. Explosivstoffe, Munition) transportiert, prallt bei einem Unfall gegen die Tunnelwand und verliert dabei seine Ladung. Das Fahrzeug kann dabei Feuer fangen und ein Abbrand der Verpackungen sowie der darin enthaltenen Gefahrgüter ist möglich. Dies kann, beispielsweise bei Explosivstoffen zu einem Brand und/oder zu Verpuffungen/Deflagrationen mit entsprechender Hitze-, Rauch- bzw. Druckwellenbildung führen. Die exponierten Verkehrsteilnehmer und Einsatzkräfte von Interventionsdiensten sind dadurch erheblich gefährdet. Im Falle einer Deflagration können erhebliche Schäden an der Tunnelinfrastruktur entstehen.
- Situation 2: Freisetzung von flüssigen Gefahrgütern**
 Ein mit flüssigem Gefahrgut (z. B. Benzin, Heizöl, Dieselöl, Acrylnitril) beladenes Fahrzeug verliert bei der Durchfahrt durch den Tunnel wegen eines defekten Ventils einen Teil seiner Ladung. Der größte Teil gelangt über das Entwässerungssystem aus dem Tunnel. Im Falle von brennbaren Flüssigkeiten wie Benzin oder Heizöl besteht die Gefahr eines nachfolgenden Brandes und/oder einer Kanalisationsexplosion. Bei umweltgefährdenden Stoffen sind entsprechende Sicherheitsvorkehrungen (Ölabscheider, evtl. Stapelbecken etc.) erforderlich, um zu verhindern, dass ein Austritt in die Umwelt erfolgt.
- Situation 3: Freisetzung von gasförmigen Gefahrgütern**
 Ein mit gasförmigen Gefahrgütern beladenes Fahrzeug kollidiert im Tunnel mit einem entgegenkommenden Pkw. Dabei werden einige der Transportbehälter derart beschädigt, dass es zu einer kontinuierlichen Freisetzung von Gasen kommt. Im Falle von brennbaren Gasen wie etwa Propan oder Butan besteht die Gefahr einer nachfolgenden Zündung und der Entstehung eines Brandes (Freistrahbrand, BLEVE¹¹⁾) und/oder einer möglichen Deflagration. Toxische Gase wie beispielsweise Chlor oder Ammoniak stellen eine unmittelbare Gefahr für die Verkehrsteilnehmer dar. Schwere Gase breiten sich ebenfalls wie Flüssigkeiten präferenziell hangabwärts aus.

Mögliche erschwerende Begleitumstände

- Erhöhtes Verkehrsaufkommen in beiden Fahrrichtungen → rasche Staubildung
- Fahrzeuginsassen können ihre Fahrzeuge nicht verlassen
- Ein oder mehrere vollbesetzte Reisebusse in Szenario involviert
- Es ist nicht bekannt, welche Gefahrgüter freigesetzt worden sind → Unklarheit bezüglich Gefahrenpotenzial, Interventionsmöglichkeiten etc.

Mögliche Folgeereignisse

- Nachfolgende Zündung von brennbaren Gefahrgütern → Brand, Explosion im Tunnelraum, Kanalisationsexplosion

¹¹⁾ Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Unter einem BLEVE wird die spontane Freisetzung eines verflüssigten, brennbaren Gases aus einem Druckbehälter unter Bildung eines Feuerballs verstanden.

Szenariotyp „Freisetzung von Gefahrgut“

- Bei einer Zündung von brennbaren Flüssigkeiten kann die sich ausbreitende, brennende Lache rasch zu einem Übergreifen des Feuers auf andere Fahrzeuge führen bzw. flüchtende Verkehrsteilnehmer gefährden.
- Kollisionen bei Wendemanövern im Tunnel
- Schäden an der Tunnelinfrastruktur

Anhang 5 Ereignisbäume

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Initialereignis KOLLISION	Unfalltyp: 1 / 3 / 6 / 7	Verteilung Schadensausmass	Schadensausmassklasse (Personenschäden)	Häufigkeit pro Jahr	Erwartetes Ausmass (Personenschäden)	Aversionsfaktor ϕ	R_b	Grenzkosten [€]	R_m

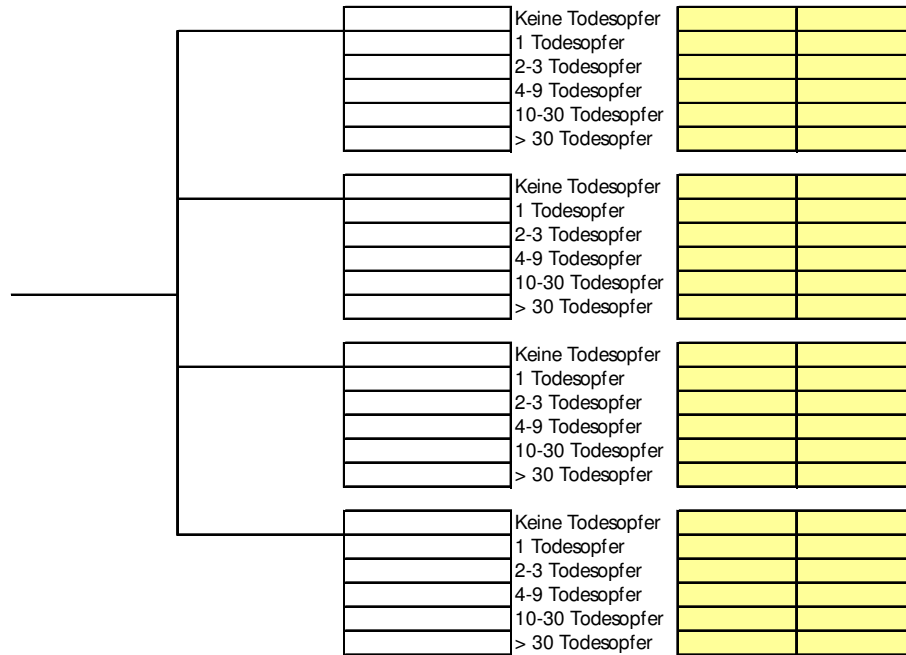


Abbildung 3: Struktur Ereignisbaum Kollision, Schadenindikator Todesopfer

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Initiale Ereignis KOLLISION	Unfalltyp: 1 / 3 / 6 / 7	Verteilung Schadensausmass	Schadensausmassklasse (Sachschäden)	Häufigkeit pro Jahr	Erwartetes Ausmass (Sachschäden)	Aversionsfaktor ϕ	R_b	Grenzkosten [€]	R_m

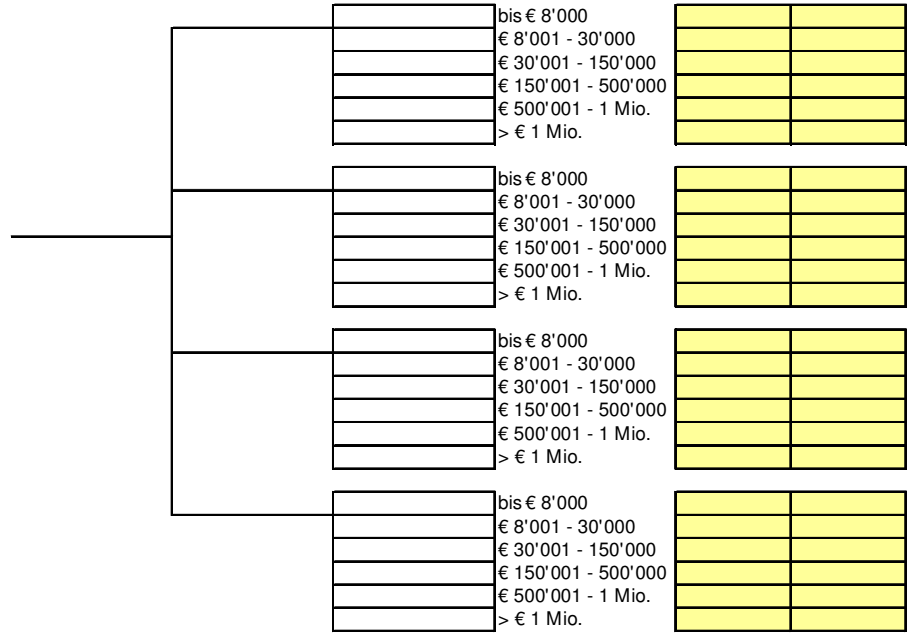


Abbildung 4: Struktur Ereignisbaum Kollision, Schadenindikator Sachschäden und Verletzte

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

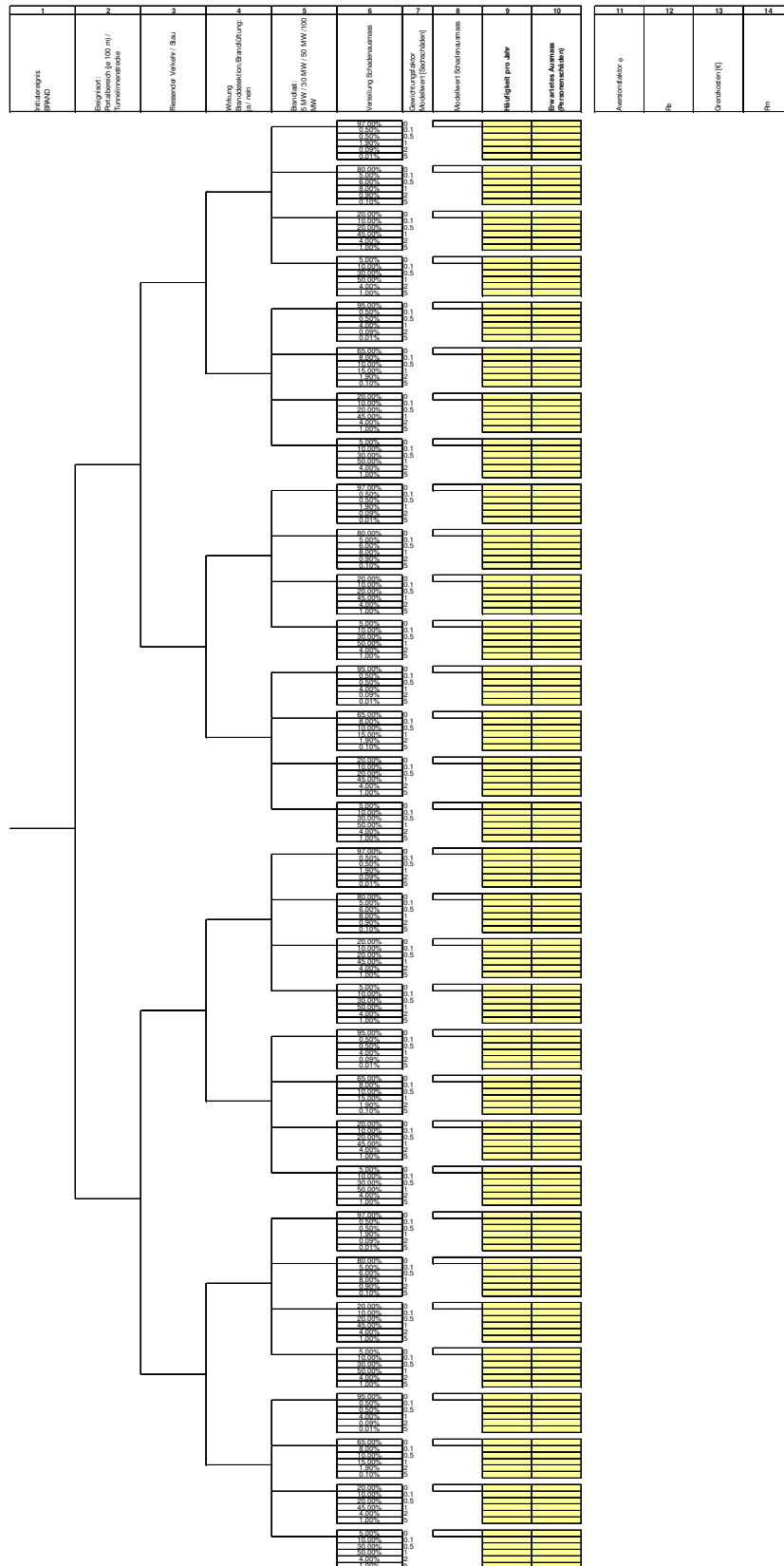


Abbildung 5: Struktur Ereignisbaum Brand, Schadenindikator Todesopfer

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

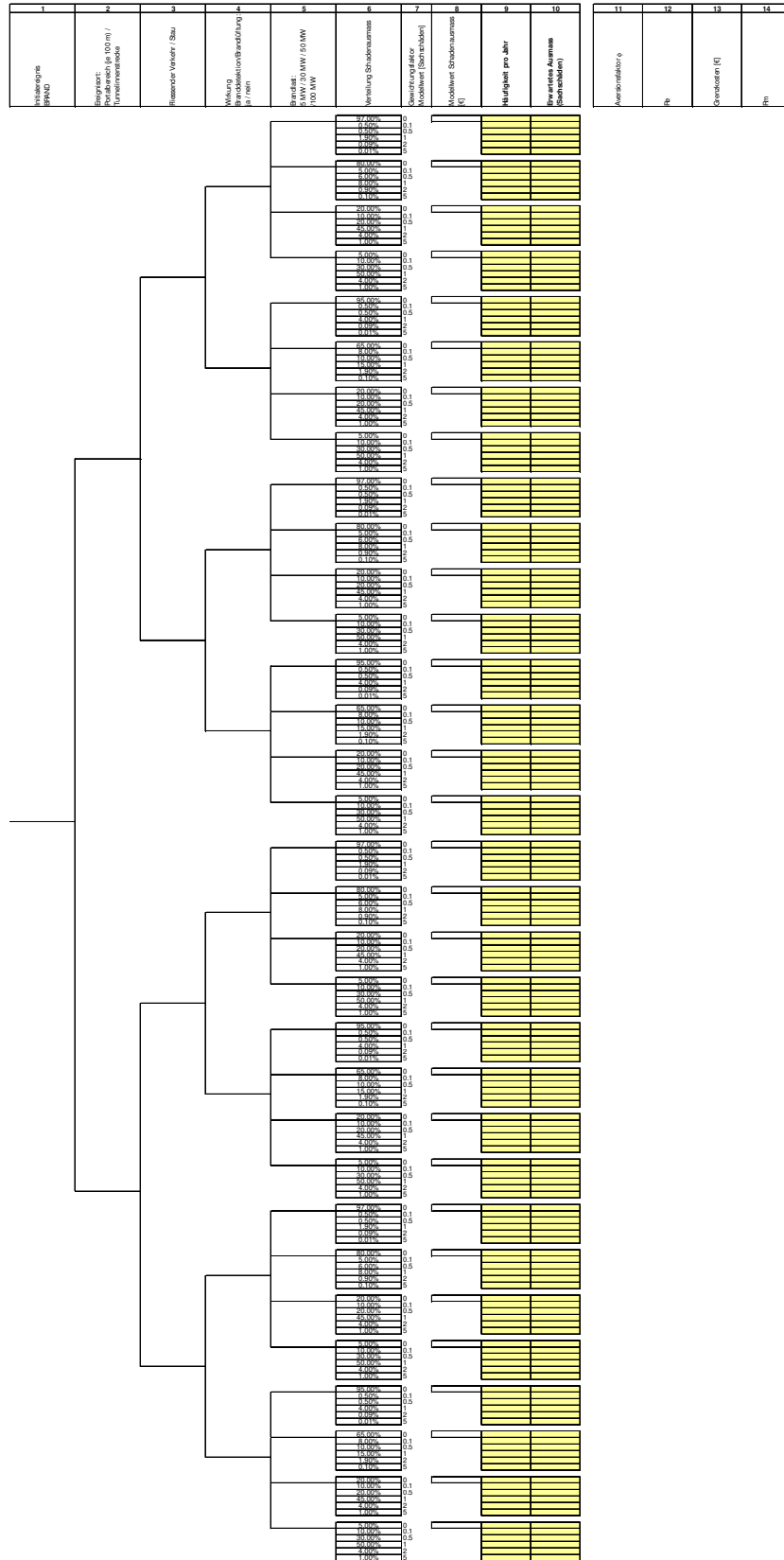


Abbildung 6: Struktur Ereignisbaum Brand, Schadenindikator Sachschäden und Verletzte

Anhang 6 Methodik der Unfallanalyse

A 6.1 Einleitung

Die Häufigkeit von Ereignisszenarien ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Nur eine genaue Analyse von zurückliegenden Ereignissen hinsichtlich ihrer Art, Ursache und der zum Zeitpunkt des Auftretens herrschenden Randbedingungen ermöglichen realistische Aussagen zu deren Häufigkeiten. Je genauer diese Häufigkeiten bestimmt werden können, umso treffender ist die Abschätzung eines bestehenden Risikos. Insbesondere für die Bewertung der risikomindernden Faktoren einzelner baulicher oder betrieblicher Ausstattungen ist eine umfangreiche Datengrundlage notwendig, die über mehrere Jahre analysiert werden muss.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde dazu eine Datenbank aufgebaut, mit deren Hilfe Ereignisanalysen durchgeführt werden können. Weiterhin wurde für alle zur Verfügung stehenden Ereignisse (Unfälle) der Jahre 2002 bis 2004 (Elbtunneln Hamburg 2003 bis 2005), eine Ereignisanalyse durchgeführt. Dies geschah für 80 der 88 Tunnel mit einer Länge über 400 m, die sich in der Baulast des Bundes befinden.

Zur Umsetzung der Datenbasis wird eine SQL-Datenbank verwendet, so dass eine möglichst hohe Kompatibilität und ein leichter Austausch mit bestehenden Datenbanken gewährleistet ist. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird dies auf Grund der freien Verfügbarkeit, der guten Performance und der einfachen Handhabung durch eine MySQL-Datenbank realisiert.

In einem weiteren Schritt werden Datenübersichten sowie Oberflächen für die Bedienung und Wartung der Datenbank in der Programmiersprache PHP erstellt. Weiterhin wird ein Webserver mit PHP-Unterstützung eingerichtet, von dem der Benutzer die generierten Oberflächen mittels eines gewöhnlichen Webbrowsers (z. B. Internet Explorer oder Firefox) aufrufen und bedienen kann. Diese Server-Client-Lösung wird gewählt, da sie es auf einfachem Wege ermöglicht, dass mehrere Personen zugleich und von verschiedenen Bedienplätzen auf die Datenbank zugreifen können, was insbesondere die Eingabe und Wartung der Bauwerks- und Unfalldaten stark vereinfacht.

A 6.2 Konzeption der Datenbasis

Die umfangreichen Daten eines Tunnels sind sehr heterogen und bedürfen zur Verwaltung und weiteren Verwendung innerhalb von Ereignisanalysen einer Datenbank. Die Daten setzen sich grundsätzlich aus den folgenden in ihrer Veränderlichkeitsstruktur unterschiedlichen Arten zusammen.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Datenartstruktur	Beispiel	Mögliche Art der Veränderung
Unveränderlich	Tunnelname, Ortslage etc.	-
Selten veränderlich	Anzahl Röhren	Nachrüstung einer weiteren Röhre, Änderung von GV in RV, Verlängerung einer Röhre
Unregelmäßig veränderlich	Ausstattungsmerkmale	Nachrüstung von Videokameras Beleuchtungsart, Länge Adaptionsbeleuchtung Markierungsleuchtknöpfe, etc.
	Adressdaten	Ansprechpartner, Veränderung der Verwaltungsstruktur
Jährliche Daten	Verkehrsdaten, Unfalldaten, Ausfalldaten	DTV, SV-Anteil, Ganglinientyp, etc. Unfälle im Tunnel Ausfälle von Lüftung, Beleuchtung, USV-Anlage, etc.

Tabelle 5: Datenstruktur eines Tunnels bezüglich der Veränderlichkeit

Der Aufbau der Datenbank orientiert sich stark aus den Anforderungen, die sich u. a. aus einer Ereignisanalyse ergeben. Werden die Unfalldaten in einer Unfallanalyse ausgewertet, müssen die zum Zeitpunkt des Unfalls herrschenden Randbedingungen berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass für eine Ursachenfindung, die aus der baulichen oder betriebstechnischen Ausstattung des Tunnels oder den Verkehrsdaten resultiert, auch diese entsprechenden Daten herangezogen werden können. Bei geeignetem Aufbau der Datenbank kann über viele Jahre eine Wirksamkeit von Nachrüstungsmaßnahmen wie z. B. die Nachrüstung von Markierungsleuchtknöpfen überprüft werden. Das folgende Schema zeigt die umgesetzte Datenbankstruktur in ihren wesentlichen Elementen. Hierzu werden entsprechende Verknüpfungen in der Datenbank vorgenommen.

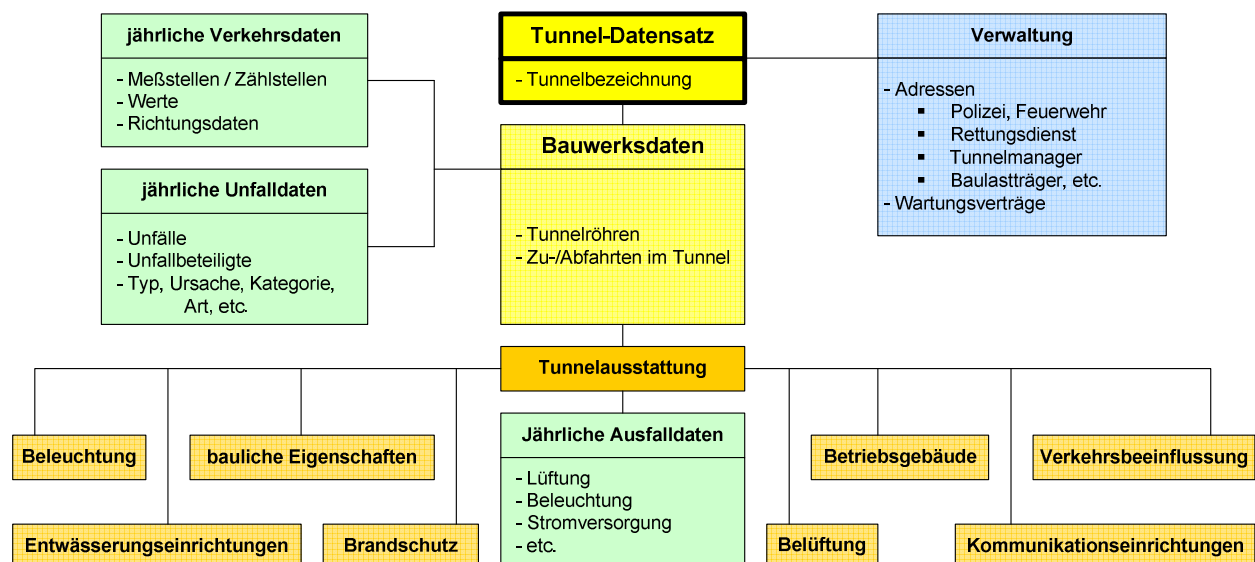


Abbildung 7: Struktureller Aufbau der Datenbank

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Der konkrete Aufbau der Datenbank ist um ein Vielfaches komplexer und besteht aus einer Vielzahl einzelner Tabellen die wiederum miteinander in eindeutigen Beziehungen stehen und durch Verknüpfungen miteinander verbunden sind. Jede dieser Tabellen kann eine beliebige Anzahl an Datensätzen enthalten.

Die Gruppierung der vorzuhaltenden Daten in den erstellten Tabellen wird so vorgenommen, dass eine möglichst geringe Redundanz der Daten entsteht, wodurch eine einfache Wartung und Übersichtlichkeit der Daten erzielt wird. So werden beispielsweise die unveränderlichen Daten des Tunnels, die der zugehörigen Röhren, sämtliche Ausstattungsmerkmale und Unfalldaten in gesonderten Tabellen vorgehalten.

Im Kern eines jeden Tunnels (Datensatz) stehen die unveränderlichen Tunneldaten, nach denen der Tunnel eindeutig identifiziert werden kann. Weiterhin werden im Kernbereich die selten veränderlichen Daten, die die Struktur des Bauwerks im Wesentlichen bestimmen, zusammengefasst. So wird z. B. jede Röhre einzeln vorgehalten, da im Laufe des Tunnelbestands weitere Röhren nachgerüstet werden können und so beispielsweise aus Gegenverkehrstunneln Richtungsverkehrstunnel werden. Zu allen veränderlichen Daten werden das Datum der Inbetriebnahme und das Ende der Betriebszeit erfasst. Diese separate Betrachtung der Tunnelröhren ist für eine eindeutige Definition von Ereignisparametern notwendig. Sie fließen in die nach Röhren getrennten Sicherheitsbewertungen (s. Abschnitt A 6.3.3) direkt ein. Beispielhaft ist die Eingabe eines Tunnels in Abbildung 8 für einen Tunnel, die Röhren, den Röhrendaten sowie die Definition der Fahrstreifen dargestellt.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

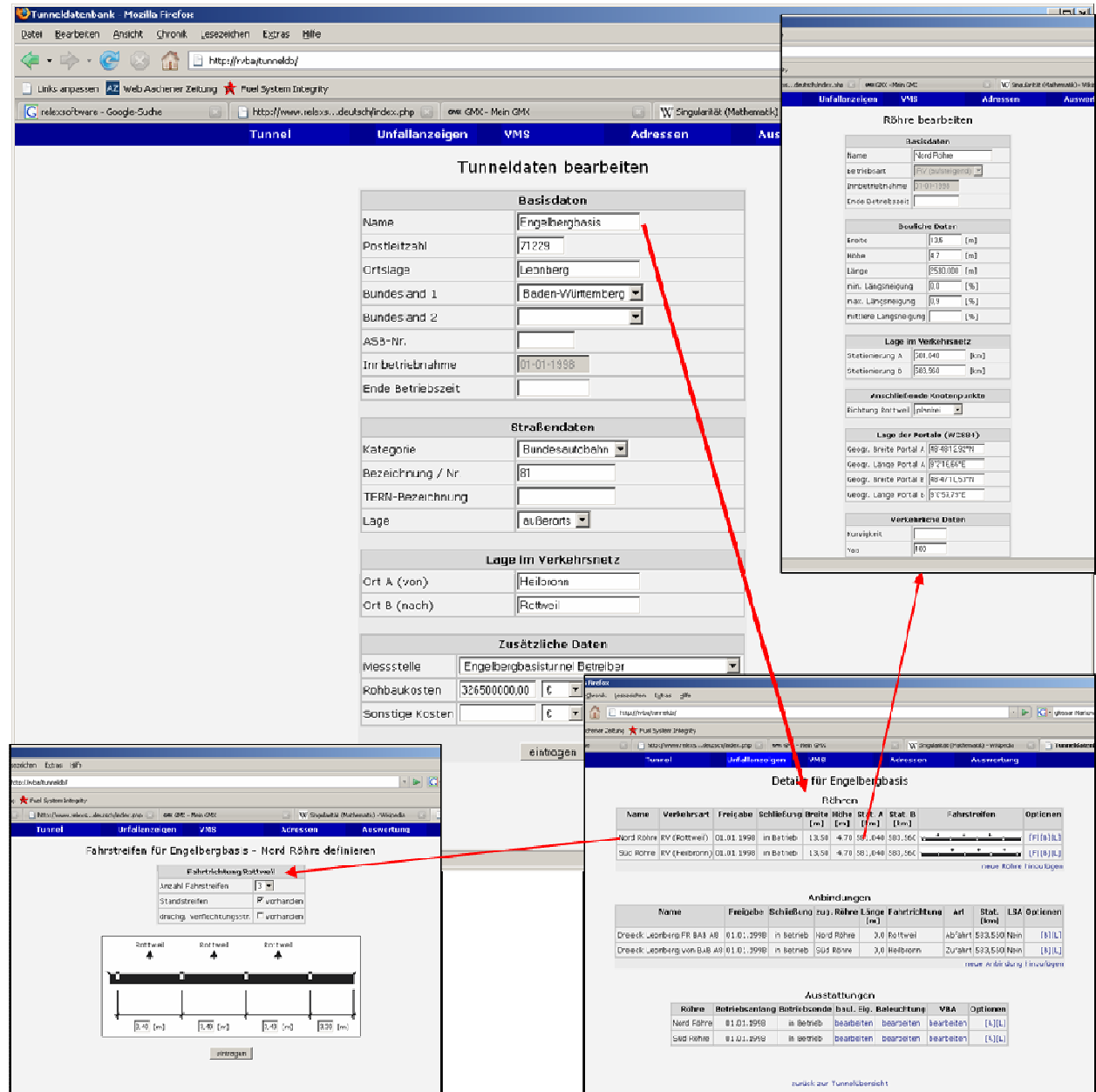


Abbildung 8: Beispiel der Dateneingabe für einen Tunnel

Die Ausstattung des Tunnels ist ebenfalls einer Betriebszeit zugeordnet, d. h. sobald sich wesentliche Veränderungen in der Ausstattung einer Tunnelröhre ergeben, endet der bisherige Ausstattungsstandard und der neue beginnt. Hierbei kann es sich z. B. um den Einbau eines neuen Lüftungssystems oder eine Verringerung von Notausgangabständen handeln. Die einzelnen Ausstattungsbereiche sind thematisch in Anlehnung an die Struktur der RABT (und damit auch der 2004/54/EG) zusammengefasst.

Ein wesentlicher Bestandteil der Datenbank sind die jährlich zu erfassenden Daten. Dies sind die Verkehrsdaten und Unfalldaten (Beispiel s. Abbildung 9), die den einzelnen Röhren und

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

damit den Tunneln zugeordnet werden können. Quelle für die Verkehrsdaten sind die automatischen Zählstellen, die i. d. R. in unmittelbarer Nähe des Tunnels liegen und die Querschnittsdaten eines Jahres liefern. Die Unfalldaten werden, wie im Kapitel A 6.3.1 beschrieben, aus den Unfallanzeigen gewonnen. Sämtliche Adressdaten im Bereich der Verwaltung des Tunnels können auf aktuellem Stand gehalten werden, da hier keine zeitliche Zuordnung notwendig ist.

The screenshot shows a web browser window with the URL <http://nvba/tunneldb/>. The main content area is titled 'Unfallanzeige für Barbarossa - Haupttröhre bearbeiten'. The form contains the following sections:

- Ort / Zeit:**
 - Datum: 28-03-2004
 - Uhrzeit: 17:41
 - Fahrtrichtung: Lendau
 - Stationierung: 1,500 [km]
 - Fahrstreifen: 1 (0 = Standstreifen, -1 = durchg. Vorbehoftungsstr.)
- Unfallgeschehen:**
 - Unfallkategorie: 3 wählen
 - Unfalltyp: 611 wählen
 - Unfallart: 1 wählen
 - Unfallsache: wählen
- Unfallumstände:**
 - Alkohol: Arbeitsstelle:
 - Fahrerflucht:
 - Brand:
 - Anprall: (Bauwerk)
- Unfallumstände (Fortsetzung):**
 - Geschwindigkeitsbegrenzung: [] [km/h]
 - Straßenzustand: trocken
 - Steigung: []
 - Straßenführung: []
 - Lichtsignalanlage: []
- Unfallfolgen:**
 - Getötete: 0
 - Schwer Verletzte: 0
 - Leicht Verletzte: 1
 - Sachschaden (gesamt): € 6500,00
 - Sachschaden (Fahrzeuge): € 6500,00
- Beteiligter:**
 - 1. Beteiligter:** Verkehrsbeteiligung: Pkw; Unfallsachen: 13 wählen, 49 wählen; Gefahrgutklasse: wählen
 - 2. Beteiligter:** Verkehrsbeteiligung: Pkw; Unfallsachen: wählen, wählen, wählen; Gefahrgutklasse: wählen

A red arrow points from the 'Unfalltyp' dropdown menu to a detailed diagram titled 'Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr'. This diagram shows a grid of icons representing various accident scenarios in longitudinal traffic, such as 'Vorfahrer fahrender', 'Spurwechsel nach links', 'Überholen auf Gegenstr.', and 'sofern kein Fahrtrunfall'.

Abbildung 9: Eingabemaske für Unfälle

Die gesamten Daten, die innerhalb der Tunneldatensätze verwaltet werden, sind nicht ausschließlich für eine Sicherheitsbetrachtung im Rahmen dieses Forschungsprojektes konzipiert und auch nicht erforderlich. Für die Sicherheitsbewertung sind die wesentlichen beeinflussenden Merkmale durch die Ereignisanalyse zu bestimmen.

A 6.3 Methodik der Unfallanalyse

A 6.3.1 Grundlagen

Für eine Unfallanalyse dienen die Verkehrsunfallanzeigen (VUA) der Polizei (Beispiel siehe Abbildung 10). Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes 979 Unfälle in einem Zeitraum von 3 Jahren zwischen 2002 und 2004 (Elbtunnel Hamburg 2003 bis 2005) betrachtet, die sich in 27 Gegen- und 53 Richtungsverkehrstunneln ereignet hatten. Da die Arbeit der Poli-

zei der Landeshoheit unterliegt, sind im Vergleich zu den Empfehlungen des Merkblatts der FGSV [30] unterschiedliche VUA möglich, so dass bei der vorliegenden bundesweiten Untersuchung eine Vielzahl von Datenblättern mit zum Teil voneinander abweichenden Inhalten berücksichtigt werden mussten. Eine Auswertung speziell von Unfällen in Tunneln ist wegen fehlender Angaben auf den VUA eingeschränkt. So konnten Angaben wie ein Brand in Folge eines Unfalls, die Kollision mit der Tunnelwand und Ursachen wie „Suizid“ oder das, zum Teil beim Einfahren in einen Tunnel beobachtete Beschlagen der Windschutzscheibe, nur aus einer Studie der textlichen Beschreibung zum Unfallhergang ermittelt werden. Eine exakte Lokalisierung der Unfallstelle im Tunnel war wegen der zum Teil nur sehr groben Angaben in den VUA (i. d. R. auf 100 m gerundet) nur eingeschränkt möglich.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

VERKEHRSunFALLANZEIGE

P S

Dienstst. Polizeipräsidium Aachen	An Aachen	<input type="checkbox"/> Tatbestandsaufnahme <input type="checkbox"/> Protokollaufnahme
Ordnungswidrigkeit		EDV-Nr. RB Krs Gem
verjährt am :		1 6 7 12
Unfallart 1 Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht 2 vorausfährt oder wartet 3 seitlich in gleicher Richtung fährt 125 4 entgegenkommt 24 5 einbiegt oder kreuzt 6 Zusammenstoß zw. Fahrz. und Fußg. 7 Aufprall auf Hinderniß auf Fahrbahn 8 Abkommen von der Fahrbahn nach Rechts 9 Abkommen von der Fahrbahn nach links 0 Unfall anderer Art	Behördenkennung NRW Unfalldatum (Tag/Mon/Jahr) Unfallzeit (Std./Min.) Wochentag Anzahl der Beteiligten getötete schwerverletzte leichtverletzte Gesamtschaden (volle EUR) Alkoholeinwirkung §142 StGB Gefährgut Kfz. n. Fahrh.	Unfallort (Gemeinde/Ortsteil/Kreis/Straße/Haus-Nr./Richtungsfahrbahn)
Charakteristik der Unfallstelle 1 Kreuzung 126-128 2 Einmündung /Anschluß 3 Grundstücksein- oder Ausfahrt 25 4 Steigung 5 Gefälle 6 Kurve	innerorts <input type="checkbox"/> 1 außerorts <input type="checkbox"/> 2 Fahrtrichtung Ordn.-Nr. aufsteigend <input type="checkbox"/> 1 absteigend <input type="checkbox"/> 2 Str. Schlüssel Haus-Nr. Straßen- Straßen-Nr. Km Von nach B Station (km) Netznoten A Unfallkategor. Unfalltyp Sondererhebung 85 86 88 89 91 92 94 102 104	
Besonderheiten der Unfallstelle 1 Unübersichtlich 129-131 2 Schienengleicher Wegübergang 3 Fußgängerüberweg 4 Fußgängerfurt 26 5 Haltestelle 6 Arbeitsstelle 7 Verkehrsberuhigter Bereich (Z.32.5) 8 Querungshilfe für Fußgänger 9 Kreisverkehr Lichtzeichenanlage 132 8 Lichtzeichenanlage in Betrieb 27 9 Lichtzeichenanlage außer Betrieb Geschwindigkeitsbegrenzung 134-136 (nur angeordnet durch Z274/274.1, z.B.=Z30;Z242/Z325=Z07) 28 Lichtverhältnisse 137-138 0 Tageslicht 29 1 Dämmerung 2 Dunkelheit 3 Straßenbeleuchtung in Betrieb Straßenzustand 140-142 0 trocken 31 1 naß/feucht 2 winterglatt 5 schlipfrig Aufprall auf Hinderniß neben der Fahrbahn 143 0 Baum 1 Mast 2 Widerlager/Brückenpfeiler 3 Schutzplanke 4 sonstiges Hinderniß 5 kein Aufprall auf Hinderniß neben der Fahrbahn	Vorläufig festgestellte Ursachen (gemäß Verzeichnis Nr. 01-69) Ord. Nr. Ord. Nr. (g) 105 107 109 112 113 115 117 120 121 124 Unfallhergang (ggf. Handskizze):	
Ausfertigung für:		Blatt 1a <input type="checkbox"/>
Unfallaufnahme durch: Name, Amtsbezeichnung, Unterschrift und Datum Geprüft und weitergeleitet mit Anlagen durch: Name, Amtsbezeichnung, Unterschrift und Datum		

Abbildung 10: Beispiel der ersten Seite einer Verkehrsunfallanzeige nach [33]

Bei der Aufnahme von Verkehrsunfällen müssen je nach Sachlage (Personenschaden, Sachschaden mit Verdacht einer Straftat oder Verkehrsunfall mit geringfügigen/nicht geringfügigen Ordnungswidrigkeiten) gesonderte Blätter der Verkehrsunfallanzeige ausgefüllt werden [33]. Es werden i. d. R. bei allen Sachlagen die folgenden Angaben aufgenommen, deren Verwendung in den weiteren Unterkapiteln erläutert wird.

- Unfalldatum
- Unfalluhrzeit
- Genauer Unfallort, Unfalllage (z. B. über Kilometrierung, Netzknoten)
- Unfallbeteiligte (Anzahl und Art der beteiligten Personen bzw. Fahrzeugtyp)
- Einfache Unfallsskizze
- Unfallursache(n)
- Unfallhergang (Unfallart und Unfalltyp)
- Angaben über Besonderheiten der Unfallstelle

Bei unvollständig oder fehlerhaft ausgefüllten VUA lassen sich die fehlenden Daten häufig aus der Beschreibung des Unfallhergangs und der Unfallsskizze ableiten, wobei von einigen betrachteten Tunneln die VUA unvollständig vorlagen und nicht bzw. nur eingeschränkt ausgewertet werden konnten.

Durch die Auswertung von Verkehrsunfallanzeigen erhält man Angaben zur Unfallstruktur und Absolutzahlen des Unfallgeschehens. Mit Hilfe der Daten zur Unfallstruktur lassen sich Aussagen über den Unfallhergang, die Unfallfolgen und die äußeren Umstände machen. Durch eine gezielte Analyse können so Schwerpunkte und charakteristische Besonderheiten dargestellt werden. In diesem Projekt dienen sie als wichtige Eingangsdaten für eine Risikoberechnung.

Die Absolutzahlen des Unfallgeschehens werden mit Hilfe von Daten zum Untersuchungszeitraum, der Länge des Untersuchungsabschnittes, und der dort im Untersuchungszeitraum vorhandenen Verkehrsstärke in relative Unfallkennwerte umgerechnet. Aus den daraus hervorgehenden Dichten und Raten kann das Risiko, einem Unfall ausgesetzt zu sein, beschrieben werden.

A 6.3.2 Analyse des Unfallgeschehens für jeden Tunnel bzw. jede Tunnelröhre

Die folgende Aufstellung zeigt die analysierten Parameter.

Art der Auswertung	Datengrundlage	Beschreibung
Unfallort im Tunnel	Betriebskilometrierung bzw. Station aus VUA Länge der Einsicht- und Übergangsstrecke aus Haltesichtweite	Der Unfallort im Tunnel wird über die Kilometerangabe erfasst, wobei diese auf den für die Analyse ausgewerteten VUA in der Vielzahl der Fälle nur mit einer Genauigkeit von 50 m oder 100 m angegeben ist, so dass eine nach [34] tolerierte Ungenauigkeit der Angabe des Unfallortes von 10 m in der Regel nicht eingehalten wird. Zudem stimmen zum Teil Kilometerangaben von Unfällen, die einen Verweis auf den Unfallort Tunnel enthalten, nicht mit den Kilometerangaben für die Ein- bzw. Ausfahrportale des Tunnels überein Aus der Länge der Haltesichtweite (Funktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) ergeben sich die Längen von Einsicht- und Übergangsstrecke. Bei ausreichend genauer Angabe der Kilometrierung ist eine lichttechnische Zuordnung des Unfallortes möglich.
Betroffener Fahrstreifen	Angabe in VUA	Bei Tunneln mit mehreren Fahrstreifen je Fahrtrichtung werden die Unfälle zusätzlich über die Angabe des Fahrstreifens mit den Ziffern 1 bis 3 (z. B. 1 = erster Fahrstreifen) lokalisiert. Unfälle die sich auf einem vorhandenen Seitenstreifen ereigneten werden über die Kennung 0, durchgehende Verflechtungsstreifen über die Kennung -1 berücksichtigt
Unfalltyp	Angabe in VUA bzw. aus Beschreibung und Skizze	Die Unfalltypen sind wie folgt unterschieden: Typ 1 Fahr Unfall Typ 2 Abbiege-Unfall Typ 3 Einbiegen / Kreuzen - Unfall Typ 4 Überschreiten - Unfall Typ 5 Unfall durch ruhenden Verkehr Typ 6 Unfall im Längsverkehr Typ 7 sonstiger Unfall Der Unfalltyp (s. Kapitel A 6.3.6) wird über die dreistellige Zahlenkennung in die Auswertung aufgenommen. Oftmals ist in der VUA lediglich der Eintrag der ersten Ziffer bzw. keine Angabe vorhanden. Die fehlenden Angaben werden dann sofern möglich durch die textlichen Angaben weitestgehend vervollständigt. Ist eine exakte Bestimmung des Unfalltyps nicht möglich wird als zweite und dritte Ziffer eine 9 vergeben. Damit wird der Unfall in der jeweiligen Typenklasse 1-7 den sonstigen Unfällen zugeordnet.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Art der Auswertung	Datengrundlage	Beschreibung
Unfallart	Angabe in VUA bzw. aus Beschreibung und Skizze	<p>Im Gegensatz zum Unfalltyp geht es bei der Unfallart nicht um die Art der Konfliktauslösung, sondern um die Beschreibung der Kollision. Die VUA gibt für die Unfallart zehn Möglichkeiten vor:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Zusammenstoß mit anderem Fzg., <ul style="list-style-type: none"> · das anfährt, anhält, oder im ruhenden Verkehr steht (1) · vorausfährt oder wartet (2) · seitlich in gleicher Richtung fährt (3) · entgegenkommt (4) · einbiegt oder kreuzt (5) - Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger (6) - Aufprall auf Hindernis auf Fahrbahn (7) - Abkommen von der Fahrbahn nach rechts (8) - Abkommen von der Fahrbahn nach links (9) - Unfall anderer Art (0) (z. B. Brand) <p>So wird zum Beispiel für einen Unfall, bei dem ein Fahrzeug aufgrund eines Hindernis auf der Fahrbahn nach rechts ausweicht, als Unfalltyp 731 „sonstiger Unfall Ladung“ und als Unfallart 8 „Abkommen von der Fahrbahn nach rechts“ und nicht Unfallart 7 „Aufprall auf Hindernis auf Fahrbahn“ vergeben.</p>
Unfallverursacher, Unfallbeteiligte, Schwerverkehr (SV)-Anteil	Spezifizierung der Unfallbeteiligten auf VUA, Verkehrsdaten	Zur Erfassung der am Unfall beteiligten Fahrzeuge dient ein zweistelliger Zahlenschlüssel. Damit lassen sich Aussagen zu Unfallursachen oder -kategorien nach Fahrzeuggruppen wie Pkw, Lkw und Motorrädern treffen. Ebenso wird der Anteil des SV-Anteils am Unfallgeschehen bezüglich des Anteils am Verkehrsaufkommen untersucht (s. Kapitel A 6.3.6).
Unfälle nach Stundengruppen Unfälle nach Wochentag Unfälle nach Monaten	Unfalldatum und -zeit	Aus dem Unfalldatum und der Unfalluhrzeit werden die Unfälle hinsichtlich ihrer zeitlichen Ausprägung untersucht werden. Es erfolgt eine Aufschlüsselung nach Wochentagen, um Spitzen an Wochenenden oder an Werktagen zu ermitteln. Eine Untersuchung nach Stunden oder Stundengruppen zeigt Spitzen im Unfallgeschehen auf, wie sie zum Beispiel im Berufsverkehr zu erwarten sind. Durch eine Aufzeichnung der Unfälle nach Monaten lassen sich Effekte wie der Anstieg der Unfallzahlen im Ferienverkehr oder im Bereich der Wintermonate aufdecken.
Unfälle nach Lichtverhältnissen außerhalb des Tunnels (hell, dunkel, Dämmerung)	Unfalldatum und -zeit Lage des Tunnels (geographische Breite und Länge)	<p>Aus der Beschreibung der Lage des Tunnels durch Gauß-Krüger Koordinaten und des Unfalldatums mit Uhrzeit können die Sonnenaufgang- und Sonnenuntergangszeiten berechnet werden (s. Kapitel A 6.3.6). So kann das Unfallgeschehen bei Helligkeit (zwischen Sonnenaufgang und -untergang), Dämmerung (bürgerliche Dämmerung ca. 39 Minuten nach Sonnenuntergang bzw. vor Sonnenaufgang) und Dunkelheit für die übrige Zeit aufgeschlüsselt werden.</p> <p>Speziell im Zusammenhang mit der lichttechnischen Zuordnung des Unfallortes (s. o.) kann ein Bezug zur Adaptionbeleuchtung hergestellt werden. Hierzu lagen jedoch keine lichttechnischen Angaben vor.</p>

Tabelle 6: Übersicht der Untersuchungsparameter für jede Tunnelröhre

A 6.3.3 Analyse des Unfallgeschehens bezüglich relevanter Parameter

Einfluss auf das Unfallgeschehen und damit auf die Sicherheit von Straßentunneln hat eine Vielzahl von Parametern. Hierzu nennen die RABT

- Tunnellänge
 - Fahrstreifenbreite
 - Trassierung
 - Verkehrsaufkommen
 - Anzahl der Tunnelröhren
 - Querschnittsgeometrie
 - Geschwindigkeit
 - Stauneigung
 - Anzahl der Fahrstreifen
 - Zu- und Abfahrten
 - Betriebsart (RV/GV)
 - SV-Anteil
- etc.

Die Vielzahl der Einfluss nehmenden Parameter und deren Interaktion lässt eine umfassende Untersuchung bei der vorliegenden Datenbasis nicht zu. So erscheinen nach Analyse des Unfallgeschehens der Einzeltunnel die in Tabelle 7 links dargestellten Parameter sinnvoll. Dies führt jedoch dazu, dass 256 gleichartige Tunneltypen untereinander hinsichtlich des Unfallgeschehens untersucht werden müssten. Eine weitere Zusammenfassung von Parametern ergibt immer noch 96 vergleichbare Tunneltypen, von denen 44 in Deutschland im Betrieb sind. So ist eine sinnvolle Auswertung wegen zu häufiger Singularitäten auch hier nicht möglich.

	sinnvolle Untersuchungsparameter		reduzierte Anzahl Untersuchungsparameter	
DTV	<i>lineare Abhängigkeit</i>		<i>lineare Abhängigkeit</i>	-
Verkehrart	RV	2	RV	2
	GV	(Varianten: 2)	GV	(Varianten: 2)
Seitenstreifen	vorhanden	2	vorhanden	2
	nicht vorhanden	(Varianten: 4)	nicht vorhanden	(Varianten: 4)
Zu-, Abfahrt	Keine	4	keine	2
	Zufahrt	(Varianten: 16)	Zu- und Abfahrt	(Varianten: 8)
	Abfahrt			
	Zu- und Abfahrt			
Längsneigung	< -3% (Gefälle)	2		
	-3 % ≤ i ≤ +3 %	(Varianten: 32)	i > 3 %	(Varianten: 16)
	> 3 % (Steigung)			
Länge	variabel	für jeden Tunnel ein Datenpunkt	400-600 m	3
			600-1.200 m	(Varianten: 48)
			>1.200 m	
SV-Anteil	0-5 %	2	< 10 %	2
	5-10 %	(Varianten: 64)	≥ 10 %	(Varianten: 96)
	>10 %			
V _{zul}	100 km/h	2		
	80 km/h	(Varianten: 128)		
	< 80 km/h			
Kurvigkeit	gering	2		
	hoch	(Varianten: 256)		

Tabelle 7: Mögliche Unterscheidung von vergleichbaren Tunneltypen für die Unfalluntersuchung

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden daher die Tunneltypen nach den offenbar wichtigsten Parametern zu 12 Tunneltypen mit den Einflussfaktoren Betriebsart (Richtungs- Gegenverkehr), Zu- und Abfahrten sowie Länge in Klassen zusammengefasst:

1	Richtungsverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	Länge < 400 - 600 m
2	Richtungsverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	600 m < Länge < 1.200 m
3	Richtungsverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	Länge > 1.200 m
4	Richtungsverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	Länge < 400 - 600 m
5	Richtungsverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	600 m < Länge < 1.200 m
6	Richtungsverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	Länge > 1.200 m
7	Gegenverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	Länge < 400 - 600 m
8	Gegenverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	600 m < Länge < 1.200 m
9	Gegenverkehrstunnel	mit Zu- und Abfahrten	Länge > 1.200 m
10	Gegenverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	Länge < 400 - 600 m
11	Gegenverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	600 m < Länge < 1.200 m
12	Gegenverkehrstunnel	ohne Zu- und Abfahrten	Länge > 1.200 m

Das Vorhandensein von Zu- und Abfahrten wurde so definiert, dass innerhalb des Tunnels sich verflechtende Verkehrsströme vorhanden sind (dies sind neben unterirdischen Zu- und Abfahrten z. B. Spuradditionen oder Beschleunigungsspuren am Einfahrportal oder Verzögerungstreifen einer Ausfahrt am Ausfahrportal). Die Längenklassen wurden in Anlehnung an die Einteilung von Tunneln gem. RABT für die Wahl des Lüftungssystems gewählt.

Die Tunnellänge wurde nicht als Faktor mit der Proportionalität von 1 angesetzt, da dies nach Analyse der einzelnen Tunnel für das Bauwerk Tunnel als abgeschlossenen Streckenabschnitt zu teilweise deutlich überhöhten Unfallzahlen führen würde.

A 6.3.4 Berechnung von Unfallhäufigkeiten als Initialereignis

Ausgewertet wurden für jeden Tunnel die Unfälle pro Fahrt in einem Zeitintervall:

$$UF = \frac{\sum_i U_i}{\sum_i F_i} \quad , \quad \text{(Gl. 1)}$$

mit

$$F_i = \frac{DTV_i}{FS_{ges,i}} \cdot FS_{Röhrenrichtung,i} \cdot d_i \quad \text{(Gl. 2)}$$

U = Unfälle

F = Fahrten im betrachteten Zeitraum

FS = Fahrstreifen

d = Tage

Über die gesamten Tunnel einer Tunnelgruppe mit gleichen Merkmalen erhält man so:

$$UF_{ges} = \frac{UF_1 \cdot F_1 + UF_2 \cdot F_2}{F_1 + F_2} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$\text{mit } UF_1 = \frac{U_1}{F_1}, UF_2 = \frac{U_2}{F_2}, \dots, UF_n = \frac{U_n}{F_n} \quad (\text{Gl. 4})$$

Ableitung von Verzweigungswahrscheinlichkeiten für Unfalltypen und Unfallschwere

Aus der Unfallanalyse ist zu erkennen, dass die Verteilung der Unfalltypen für die Tunneltypen sehr unterschiedlich ist. Ebenso ist die Verteilung des Schadenausmaßes unterschiedlich verteilt. Die vorliegende Statistik ist jedoch ausreichend um mit geeigneten Modellen fehlende Werte zu ergänzen. Diese Modelle werden in Anhang 7 bei der Vorstellung der Ergebnisse erläutert.

A 6.3.5 Verwendung von Literaturergebnissen vorangegangener Studien

Neben der hier durchgeführten Unfallanalyse wurden die Ergebnisse mit den Erkenntnissen aus bereits abgeschlossenen Untersuchungen verglichen und auf Plausibilität geprüft. Dabei wurden die folgenden Quellen verwendet:

In der von Brilon [38] durchgeführten Forschungsarbeit, die ein Verfahren zur Ermittlung von Straßenquerschnitten in Tunneln modelliert, wurden unter anderem die Unfallzahlen von 81 deutschen inner- und außerorts gelegenen Tunnelstrecken über einen Zeitraum von zwei bis neun Jahren erfasst. In der Untersuchung wird eine Differenzierung nach 2 bzw. 3-streifigen Gegenverkehrstunneln mit und ohne Standstreifen und Gegenverkehrstunneln vorgenommen. Grundlage waren jedoch nicht die Verkehrsunfallanzeigen der Polizei.

Der „Sicherheitsvergleich von Tunneln“ von Robatsch und Nussbaumer setzt sich aus zwei Teilen zusammen. Im ersten Teil der österreichischen Arbeit wurde die Studie „Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr“ [39] um zwei Jahre fortgesetzt. Diese analysierte die Unfälle von 20 Tunneln mit Gegenverkehr und 110 Tunnelröhren mit Gegenverkehr der Jahre 1999 bis 2001. Der Sicherheitsvergleich im zweiten Teil der Untersuchung umfasst die Jahre 2002 und 2003 und beschränkt sich auf 19 Gegen- und 31 Richtungsverkehrstunnel mit einer Länge über 1.000 m [40].

In der Untersuchung der schweizerischen Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu) wurde das Unfallgeschehen im Zeitraum von 1995 bis 1999 in 127 Tunnelanlagen untersucht und durch eine statistische Analyse auf signifikante Zusammenhänge zu Tunnelmerkmalen überprüft. Die Tunnel weisen Längen zwischen 200 m und 17.000 m auf. Die durchschnittliche Länge lag bei über 600 m, wobei die 2-röhrigen Tunnelanlagen mit einem Anteil von ca. 70 % im Schnitt kürzer waren [41].

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

In der deutschen Studie von Kayser und Baltzer aus dem Jahr 1985 wurden insgesamt 11 Straßentunnel aus Deutschland und der Schweiz untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt auf dem Geschwindigkeits-, Abstands- und Spurverhalten bei verschiedenen Ein- und Ausfahrttypen (keilförmige Ein- /Ausfahrt, Ein- /Ausfahrt mit Ein- /Ausfädelungsspur, Ein- /Ausfahrt mit Spurdation/ -subtraktion) [42].

A 6.3.6 Verwendete Zahlenschlüssel, Tafeln, Diagramme

Zahlenschlüssel Unfalltypen, Unfallarten, Unfallkategorien, Fahrzeuge

Zahlenschlüssel für Unfalltypen	
1	Fahrunfall
2	Abbiege-Unfall
3	Einbiegen / Kreuzen - Unfall
4	Überschreiten - Unfall
5	Unfall durch ruhenden Verkehr
6	Unfall im Längsverkehr
7	sonstiger Unfall
Zahlenschlüssel für Unfallarten	
1	Zusammenstoß m. and. Fzg. d. anfährt, anhält o. i. ruh. Verkehr steht
2	Zusammenstoß m. and. Fzg. d. vorausfährt o. wartet
3	Zusammenstoß m. and. Fzg. d. seitr. in gleicher Richtung fährt
4	Zusammenstoß m. and. Fzg. d. entgegenkommt
5	Zusammenstoß m. and. Fzg. d. einbiegt oder kreuzt
6	Zusammenstoß zw. Fzg. u. Fußgänger
7	Aufprall auf Hindernis auf Fahrbahn
8	Abkommen von Fahrbahn nach rechts
9	Abkommen von Fahrbahn nach links
0	Unfall anderer Art

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zahlenschlüssel für Unfallkategorien (nach schwerster Unfallfolge)		
1	Unfall mit Getöteten	Mindestens ein getöteter Verkehrsteilnehmer
2	Unfall mit Schwerverletzten	Mindestens ein Schwerverletzter Verkehrsteilnehmer, aber keine Getöteten
3	Unfall mit Leichtverletzten	Mindestens ein leichtverletzter Verkehrsteilnehmer, aber keine Getöteten und keine Schwerverletzten
4	Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden	Unfälle mit Sachschaden und Straftat bestand oder Ordnungswidrigkeitsanzeige, bei denen mind. Ein Kraftfahrzeug nicht mehr fahrbereit ist (abschleppen)
5	Sonstiger Unfall mit Sachschaden	Sachschadenumfälle mit Straftatbestand oder Ordnungswidrigkeitsanzeige ohne Alkohol, bei denen alle Kraftfahrzeuge fahrbereit sind, mit lediglich geringfügiger Ordnungswidrigkeit (Verwarnung), unabhängig, ob Kfz fahrbereit oder nicht fahrbereit
6	Unfall mit Sachschaden und Alkohol	Alle übrigen Sachschadenumfälle mit Alkohol
7	<i>Sonstiger Unfall mit Sachschaden und Fahrerflucht</i>	<i>Existiert nur in Nordrhein-Westfalen</i>

Tabelle 8: Zahlenschlüssel für Unfalltypen, Unfallarten, Unfallkategorien
nach [30], [31]

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zahlenschlüssel für Fahrzeuge	
0	unbekannt
01	Kleinkraftrad
02	Mofa 25
11	Motorrad > 80 cm ³
12	Leichtkraftrad
21	Pkw
31	Kraftomnibus > 9 Sitzplätze
32	Reisebus
33	Linienbus
34	Schulbus
41	Lieferwagen
45	Lkw
51	Sattelschlepper mit Auflieger
52	Sattelschlepper ohne Auflieger
58	Lkw mit Spezialaufbau
59	übrige Kfz
71	Fahrrad
81	Fußgänger

Tabelle 9: Zahlenschlüssel für Fahrzeuge
nach [31]

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

detaillierte Aufschlüsselung der Unfalltypen in Straßentunneln















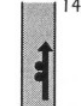











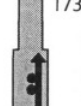



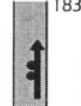
Ohne mitwirkende Besonderheiten von Querschnitt und Längsneigung	10		101		102						109	Kurvenverlauf nicht bekannt	
	11		111		112						119	Kurvenverlauf nicht bekannt	
	12		121		122		123					129	Fahrt-richtung nicht bekannt
	13		131		132							139	Verschw.-richtung nicht bekannt
	14		141									149	
Mitwirkend:	15		151		152		153					159	Straßenverlauf nicht bekannt
	16		161		162		163					169	Straßenverlauf nicht bekannt
	17		171		172		173					179	Straßenverlauf nicht bekannt
	18		181		182		183					189	Straßenverlauf nicht bekannt
sonstige Fahrurfälle											199		

Abbildung 11: Unfalltyp 1: Fahrurfall (F)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln


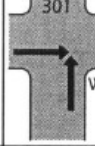
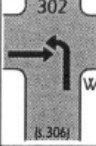
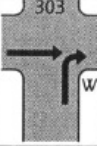
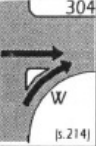

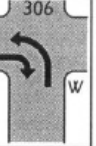


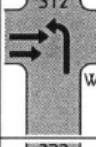
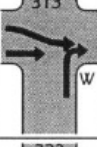




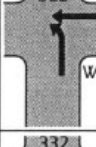
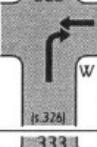


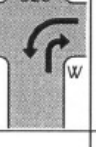

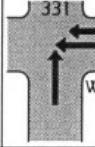
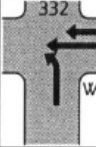
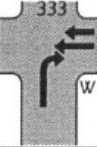

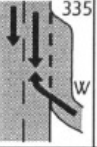

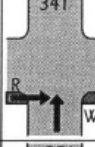
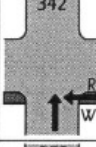



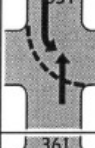

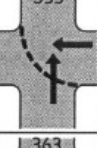
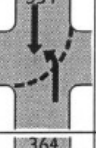
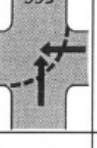

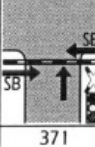
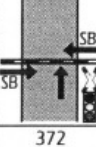
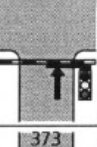
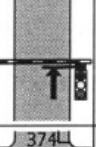

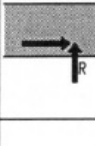
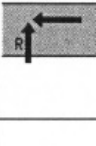
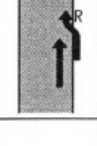
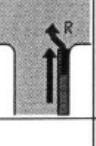
Bevorrechtigtes Fahrzeug	 30 von links							309 Fahr- richtung unklar	
	 31 Überholer von links								319 Fahr- richtung unklar
	 32 von rechts								329 Fahr- richtung unklar
	 33 Überholer von rechts								339 Fahr- richtung unklar
	 34 vom Radweg								349 Straßenseite/ Fahr- richtung von R unklar
 35 abkn. Vorfahrt								359 unklar ob 351-355	
 36 Bahnübergang								369 Art der Sicherung/ Unfallstelle unklar	
 37 kreuzender/ einfahrender Radfahrer								379 unklar ob 371-374	
sonstige Einbiegen/Kreuzen-Unfälle W = Wartepflicht								399	

Abbildung 12: Unfalltyp 3: Einbiege/Kreuzen (EK)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Auffahren auf...	60	601	602	603	604		609
	Vorausfahrender						Spur unklar
	61	611	612	613	614		619
	Stau						Spur unklar
	62	621	622	623	624		629
Wartepflichtiger	W	W	LZA auch an Knoten	Bahnübergang		Art der Wartepflicht unklar	
63	631	632	633	634	635		639
Spurwechsler nach links			Spurende	Abbiegegebot	Rechts-Überholen		Spurwechsel aus unklaren Gründen
64	641	642	643	644	645	646	649
Spurwechsler nach rechts	Spw. wegen Vorausfahrendem	Spw. wegen Stau	Spw. wegen Spurende	Abbiegegebot	Spw. nach Überholen auf Gegenseite	nach Überholen auf Richtungsfahrspur	Spurwechsel aus unklaren Gründen
65	651	652					
Nebeneinanderfahren		Überholer auf Gegenseite					
66	661	662	663	664			669
Überholer-Gegenverkehr		F	F				Art / Gehrichtung unklar
67	671	672	673	674			679
Fußgänger-Fahrzeug	F	F	F	F			Straßenseite/ Gehrichtung unklar
68	681	682	683	sofern kein Fahrtenfall			689
Begegnende							unklar ob 681-683
sonstige Unfälle im Längsverkehr							699
W = Wartepflicht							

Abbildung 13: Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr (LV)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

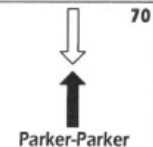

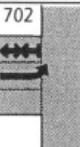


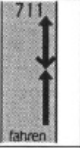
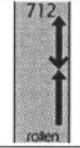
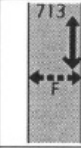
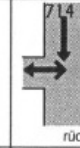

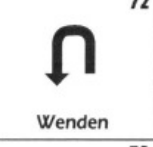
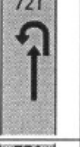
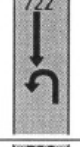
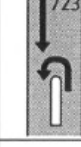



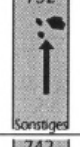



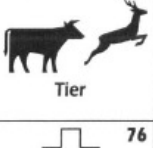
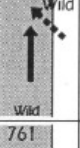






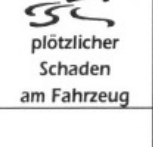



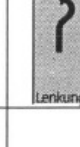
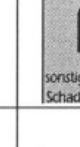
 <p>70 Parker-Parker</p>	 <p>701</p>	 <p>702</p>	 <p>703 P auf Parkplatz</p>				<p>709 unklar ob 701-703</p>
 <p>71 Rückwärts- fahren</p>	 <p>711 fahren</p>	 <p>712 rollen</p>	 <p>713 F</p>	 <p>714</p>	 <p>715</p>		<p>719 unklar ob 711-715</p>
 <p>72 Wenden</p>	 <p>721</p>	 <p>722</p>	 <p>723</p>	 <p>724</p>			<p>729 unklar ob 721-724</p>
 <p>73 bewegliches Hindernis</p>	 <p>731 Ladung</p>	 <p>732 Sonstiges</p>					
 <p>74 liegendebliebenes Fahrzeug</p>	 <p>741 Unfall</p>	 <p>742 Panne</p>					<p>749 unklar ob 741oder742</p>
 <p>75 Tier</p>	 <p>751 Wild</p>	 <p>752 HausTier unbeaufsichtigt</p>	 <p>753 HausTier beaufsichtigt</p>				<p>759 unklar ob 751-753</p>
 <p>76 plötzliches körperliches Unvermögen</p>	 <p>761 Einschlafen</p>	 <p>762 Schwächeanfall</p>	 <p>763 Sonstiges (nicht Alkohol)</p>				
 <p>77 plötzlicher Schaden am Fahrzeug</p>	 <p>771 Reifen</p>	 <p>772 Windschutz- scheibe</p>	 <p>773 Bremsen</p>	 <p>774 Lenkung</p>	 <p>775 sonstiger Schaden</p>		
<p>übrige Unfälle</p>							<p>799</p>

Abbildung 14: Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall (SO)

Zahlenschlüssel für Unfallursachen

- 0 k.A.
- 1 Verkehrstüchtigkeit - **Alkohol**
- 2 Verkehrstüchtigkeit - **berauschende Mittel (Drogen)**
- 3 Verkehrstüchtigkeit - **Übermüdung**
- 4 Verkehrstüchtigkeit - **sonst. körp. + geist. Mängel**

- 10 Straßenbenutzung - **falsche Fahrbahn/falsche Straßenteile**
- 11 Straßenbenutzung - **Verstoß Rechtsfahrgebot**

- 12 Geschwindigkeit - **Überschreiten zul v**
- 13 Geschwindigkeit - **andere Fälle nicht angepasstes v**

- 14 Abstand - **Sicherheitsabstand zu gering**
- 15 Abstand - **Bremsen voraus fahrender Fzg ohne Grund**

- 16 Überholen - **unzulässiges Rechtsüberholen**
- 17 Überholen - **trotz Gegenverkehr**
- 18 Überholen - **trotz unklarer Verkehrslage**
- 19 Überholen - **trotz unzureichender Sichtverhältnisse**
- 20 Überholen - **mit fehlender Ankündigung u./o. Beachtung des Verkehrs**
- 21 Überholen - **Fehler b. Wiedereinordnen**
- 22 Überholen - **sonstige Fehler**
- 23 Überholen - **Fehler beim Überholtwerden**

- 24 Vorbeifahren - **Nichtbeachten des Vorrangs entgegenkommender Fzg.**
- 25 Vorbeifahren - **Nichtbeachten des nachfolgenden Verkehrs.**

- 26 Nebeneinanderfahren - **Fahstreifenwechsel**

- 27 Vorfahrt, Vorrang - **Nichtbeachten "rechts vor links"**
- 28 Vorfahrt, Vorrang - **Nichtbeachten Verkehrszeichen**
- 29 Vorfahrt, Vorrang - **der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs**
- 31 Vorfahrt, Vorrang - **Nichtbeachten LSA**
- 32 Vorfahrt, Vorrang - **entgegenkommendes Fzg.**

- 35 Abbiegen, Rückwärtsf., Ein- + Anfahren - **Fehler beim Abbiegen**
- 36 Abbiegen, Rückwärtsf., Ein- + Anfahren - **Fehler beim Wenden+Rückw. Fahren**
- 37 Abbiegen, Rückwärtsf., Ein- + Anfahren - **Fehler beim Einfahren in den fließenden Verkehr**

- 43 Ruhender Verkehr, Verkehrssicherung - **Unzulässiges Halten oder Parken**
- 44 Ruhender Verkehr, Verkehrssicherung - **Mangelnde Sicherung liegengebliebener Fzg.**
- 46 Ruhender Verkehr, Verkehrssicherung - **Nichtbeachten der Beleuchtungsvorschrift**

- 47 Ladung Besetzung - **Überladung, Überbesetzung**
- 48 Ladung Besetzung - **Unzureichend gesicherte Ladung**

- 49 **Andere Fehler Fahrzeugführer**
- 491 Andere Fehler Fahrzeugführer - **Unachtsamkeit** (Radio, Zigarette, Handy)
- 492 Andere Fehler Fahrzeugführer - **Suizid**

- 50 Technische Mängel - **Beleuchtung**
- 51 Technische Mängel - **Bereifung**
- 52 Technische Mängel - **Bremsen**
- 53 Technische Mängel - **Lenkung**
- 54 Technische Mängel - **Zugvorrichtung**
- 55 Technische Mängel - **andere Mängel**

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

70	Straßenverhältnisse - ausgelaufenes Öl
71	Straßenverhältnisse - andere Verunreinigungen
72	Straßenverhältnisse - Schnee, Eis
73	Straßenverhältnisse - Regen
74	Straßenverhältnisse - andere Einflüsse
75	Zustand der Straße - Spurrillen + Regen, Schnee o. Eis
76	Zustand der Straße - Anderer Zustand
77	Zustand der Straße - Mangelhafte Zustand Verkehrszeichen o. -einrichtungen
78	Zustand der Straße - Mangelhafte Beleuchtung
80	Witterungseinflüsse, Sichtbehinderung durch - Nebel
81	Witterungseinflüsse, Sichtbehinderung durch - Starker Regen, Hagel, Schnee
82	Witterungseinflüsse, Sichtbehinderung durch - Blendende Sonne
83	Witterungseinflüsse, Sichtbehinderung durch - Unwetter, Sonstiges
84	Witterungseinflüsse, Sichtbehinderung durch - Seitenwind
85	Hindernisse - Mangelhaft gesicherte Arbeitsstelle
86	Hindernisse - Wild
88	Hindernisse - Sonstiges Hindernis
89	Sonstige Ursachen
891	Sonstige Ursachen - Beschlagene Windschutzscheibe

Tabelle 10: Zahlenschlüssel für Unfallursachen
nach [30] Ergänzungen (dreistellig Ergänzungen (dreistellig))

Formel zur Berechnung der Sonnenauf- und Untergangszeit

Für die Zuordnung der Unfälle ist eine Einteilung gegliedert nach Tag, Nacht und Dämmerung erforderlich. Dazu können die Sonnenaufgangs- und -untergangszeiten in Abhängigkeit des Unfallzeitpunktes und der geografischen Lage berechnet werden:

$$\text{Aufgang Ortszeit} = 12 - \text{Zeitdifferenz} - \text{Zeitgleichung} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\text{Untergang Ortszeit} = 12 + \text{Zeitdifferenz} - \text{Zeitgleichung} \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Zeitgleichung entspricht der Differenz von wahrer Ortszeit WOZ (Zeit nach Sonnenuhr, wobei eine Taglänge um den Mittelwert 24 Stunden schwankt) zur mittleren Ortszeit MOZ (einer gedachten mittleren Sonne, die scheinbar entlang des Himmelsäquators mit konstanter Geschwindigkeit läuft, so dass eine Taglänge genau 24 Stunden entspricht) und ergibt sich zu:

$$\text{WOZ} - \text{MOZ} = -0,1752 \cdot \sin(0,033430 + T + 0,5474) - 0,1340 + \sin(0,018234 \cdot T - 0,1939) \quad (\text{Gl. 7})$$

mit: T = x-ter Tag des Jahres, (z. B. 1. Januar = 1, 1. Februar = 32)

Die Zeitdifferenz gibt die Zeit an, die die Sonne vom wahren Mittag (dem Mittag nach Sonnenuhr) bis zum Erreichen einer bestimmten Horizonthöhe h benötigt und ermittelt sich zu:

$$\text{Zeitdifferenz} = 12 \cdot \arccos((\sin(h) - \sin(B) \cdot \sin(\text{Deklination})) / (\cos(B) \cdot \cos(\text{Deklination}))) / \pi \quad (\text{Gl. 8})$$

mit: h = -50 (= -0,0145 Bogenminuten)

$$B = \pi \cdot 52,5 / 180 = 0,9163$$

Wie lange die Sonne über dem Horizont bleibt ist abhängig von Ihrer Höhe beim passieren der Südrichtung (Meridian). Mit der Zeitgleichung wird der Zeitpunkt bestimmt, zu dem die Sonne im Süden steht (Mittag). Um nun zu wissen, wie lange die Sonne über dem Horizont bleibt, benötigt man die Deklination. Diese gibt an über welchem Breitengrad die Sonne gerade im Zenit steht.

$$\text{Deklination} = 0,40954 + \sin(0,0172 + (T - 79,35)) \quad (\text{Gl. 9})$$

Die Ortszeit, auch mittlere Ortszeit genannt, ist jedoch nicht die mittlere Ortszeit eines Beobachtungsortes, sondern einer bestimmten Zeitzone. Diese Zonenzeit ist die mittlere Ortszeit eines bestimmten Längengrades. Die mittlere Ortszeit von null Grad Länge (Greenwich) entspricht somit der Weltzeit. Daher bedarf es noch einer Anpassung der Formel hinsichtlich des Längengrades:

$$\text{Sonnenaufgang} = \text{Aufgang Ortszeit} - \text{geographische Länge} / 15 + \text{Zeitzone} \quad (\text{Gl. 10})$$

$$\text{Sonnenuntergang} = \text{Untergang Ortszeit} - \text{geographische Länge} / 15 + \text{Zeitzone} \quad (\text{Gl. 11})$$

Hierbei stellt die Zeitzone die Differenz zwischen Zonenzeit und Weltzeit dar. In Deutschland beträgt diese Differenz während der Winterzeit eine und während der Sommerzeit zwei Stunden [32].

Anhang 7 Ergebnisse der Unfallanalyse

Ausgewertete Tunnel

Für die Unfallanalyse konnten 80 deutsche Tunnel untersucht werden, von denen 27 Gegenverkehrstunnel und 53 Richtungsverkehrstunnel sind. Durch die differenzierte Betrachtung von Röhrenrichtungen ergaben sich 4.972 Betriebsmonate der 166 Tunnelröhrenrichtungen. In den folgenden Übersichten sind die untersuchten Tunnel nach den in Abschnitt A 6.3.3 genannten Tunnelgruppen geordnet aufgeführt.

RV, mit Zu- / Abfahrten, Länge < 600m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Sachsen	Mosel	Süd Röhre	2	n	440
		Nord Röhre	2	n	440
Nordrhein-Westfalen	Oberkassel	West Röhre	2	n	556
		Ost Röhre	2	n	510
RV, mit Zu- / Abfahrten, Länge 600 - 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anzahl Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Nordrhein-Westfalen	Flughafen	Röhre Nord-West	3	j	1.070
		Röhre Süd-Ost	3	j	1.070
Nordrhein-Westfalen	Lärmschutz-Halbabdeckung	Halbabdeckung Sternenberg	2	j	626
Bayern	Pfaffenstein	West Röhre	2	n	880
		Ost Röhre	2	n	880
Bayern	Prüfening	West Röhre	2	n	618
		Ost Röhre	2	n	618
Schleswig- Holzstein	Rendsburg / Nord-Ostseekanal	Röhre West	2	n	801
		Röhre Ost	2	n	801
Nordrhein-Westfalen	Ruhrschnellweg	Röhre Nord	2	j	1.005
		Röhre Süd	2	j	1.005
Nordrhein-Westfalen	Strümp	Röhre Nord	3	j	640
		Röhre Süd	3	j	640
Nordrhein-Westfalen	Universität	Röhre Nord	3	j	1.026
		Röhre Süd	3	j	1.026
Nordrhein-Westfalen	Wersten	Röhre Nord	3	j	860
		Röhre Süd	3	j	860

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

RV, mit Zu- / Abfahrten, Länge > 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Hamburg	Elbtunnel	Ost Röhre 01. Phase	2	n	2.653
		Ost Röhre 03. Phase	2	n	2.653
		Ost Röhre 05. Phase	2	n	2.653
Baden-Württemberg	Engelbergbasis	Nord Röhre	3	j	2.530
		Süd Röhre	3	j	2.530
Baden-Württemberg	Kappelberg	Süd Röhre bis 05-2004	2	j	1.565
Nordrhein-Westfalen	Wambel	Röhre Ost	2	j	1.420
		Röhre West	2	j	1.420
Nordrhein-Westfalen	Weserauentunnel	Ost Röhre	2	n	1.730

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

RV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge < 600 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Thüringen	Behringen	Ost Röhre	2	n	465
		West Röhre	2	n	465
Bayern	Eching	Süd Röhre	2	j	413
		Nord Röhre	2	j	413
Bayern	Einhausung Goldbach-Hösbach Ost	Nord Röhre	3	j	380
Bayern	Etterschlag	Süd Röhre	2	j	495
		Nord Röhre	2	j	495
Baden-Württemberg	Heilsberg	Nord Röhre	2	n	448
		Süd Röhre	2	n	479
Nordrhein-Westfalen	Hemberg	Röhre Ost	2	n	418
		Röhre West	2	n	400
Baden-Württemberg	Herfatz	Süd Röhre	2	j	440
		Nord Röhre	2	j	440
Baden-Württemberg	Hölzern	West Röhre	2	n	470
		Ost Röhre	2	n	462
Rheinland-Pfalz	Hörnchenberg	Röhre Nord-Ost	2	n	512
		Röhre Süd-West	2	n	536
Bayern	Kohlberg	Süd Röhre	2	n	598
Baden-Württemberg	Lehrertal	West Röhre	2	n	400
		Ost Röhre	2	n	400
Niedersachsen	Lärmschutztunnel Dissen	West Röhre	2	j	500
		Ost Röhre	2	j	500
Nordrhein-Westfalen	Olpe	Süd Röhre	2	n	510
		Nord Röhre	2	n	510
Baden-Württemberg	Virngrund	West Röhre	2	n	468
		Ost Röhre	2	n	465

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

RV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge 600 - 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Baden-Württemberg	Agnesburg	West Röhre	3	n	704
		Ost Röhre	2	n	704
Bayern	Allach	Süd Röhre	3	j	1.030
		Nord Röhre	3	j	1.060
Thüringen	Alte Burg	Röhre Nord	2	n	866
		Röhre Süd	2	n	866
Baden-Württemberg	Döggingen	Süd Röhre	2	n	1.028
		Nord Röhre	1	n	1.196
Bayern	Einhausung Goldbach-Hösbach Ost	Süd Röhre	3	j	719
Niedersachsen	Emstunnel	Röhre Nord-West	2	j	945
		Röhre Süd-Ost	2	j	945
Thüringen	Hochwald	Röhre Ost	2	n	1.058
		Röhre West	2	n	1.058
Baden-Württemberg	Hohentwiel	Nord Röhre	2	n	833
		Süd Röhre	2	n	782
Baden-Württemberg	Kappler	Süd Röhre	2	n	1.200
Bayern	Kohlberg	Nord Röhre	2	n	602
Baden-Württemberg	Laemmerbuckel	Laemmerbuckel Röhre	2	n	624
Niedersachsen	Lärmschutz-Tunnel Lindenberg	Lindenberg Röhre	2	j	691
Nordrhein-Westfalen	Oberdollendorf	West-Röhre	2	n	630
		Ost-Röhre	2	n	630
Saarland	Pellinger Berg	Süd Röhre	2	n	600
		Nord Röhre	2	n	600
Nordrhein-Westfalen	Reichswaldallee	Röhre Nord	2	j	695
		Röhre Süd	2	j	725
Nordrhein-Westfalen	Rheinschlinge	Röhre Nord-Ost	3	j	870
		Röhre Süd-West	3	j	870
Baden-Württemberg	Schützenallee	Süd Röhre	2	n	800
		Nord Röhre	2	n	830
Baden-Württemberg	Schönbuch	West Röhre	2	j	626
		Ost Röhre	2	j	620

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

RV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge > 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Thüringen	Berg Bock	Röhre Ost	2	n	2.750
		Röhre west	2	n	2.730
Bayern	Einhausung Goldbach-Hösbach West	Süd Röhre	3	j	1.383
		Nord Röhre	3	j	1.380
Hamburg	Elbtunnel	4. Röhre	2	j	3.101
Hamburg	Elbtunnel	Mittel Röhre 03. Phase	2	n	2.653
		Mittel Röhre 05. Phase	2	n	2.653
		Mittel Röhre 07. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 03. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 07. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 10. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 12. Phase	2	n	2.653
Bayern	Farchanttunnel	West Röhre	2	n	2.274
		Ost Röhre	2	n	2.390
Baden-Württemberg	Kappelberg	Nord Röhre bis 05-2004	2	j	1.565
Baden-Württemberg	Kappler	Nord Röhre	2	n	1.868
Sachsen	Königshainer Berge	Süd Röhre	2	n	3.300
		Nord Röhre	2	n	3.300
Baden-Württemberg	Nollinger Berg	Ost Röhre	2	n	1.268
Thüringen	Rennsteig	Röhre Nord-West	2	n	7.878
		Röhre Süd-Ost	2	n	7.916
Nordrhein-Westfalen	Weserauentunnel	West Röhre	2	n	1.730
Niedersachsen	Wesertunnel	Röhre Nord	2	n	1.640
		Röhre Süd	2	n	1.640
GV, mit Zu- / Abfahrten, Länge < 600 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Niedersachsen	Bovenden	Hauptröhre	1	j	400
GV, mit Zu- / Abfahrten, Länge 600 - 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Baden-Württemberg	Rombachtal	Rombachtal Röhre	1	n	870

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

GV, mit Zu- / Abfahrten, Länge > 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Baden-Württemberg	Michaelstunnel	Michaelstunnel Röhre	2	n	2.533
GV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge < 600 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Niedersachsen	Bovenden	Hauptröhre	1	j	400
Rheinland-Pfalz	Ditschhard	Ditschhard Röhre	3	n	565
Bayern	Einhausung Deggendorf Nord	Deggendorf Röhre	3	j	480
Baden-Württemberg	Ertingen	Ertingen Röhre	2	n	409
Baden-Württemberg	Laufen	Laufen Röhre	2	n	540
Hessen	Schürzeberg	Schürzeberg Röhre	2	n	520
Bayern	Wendelberg	Wendelberg Röhre	2	n	483

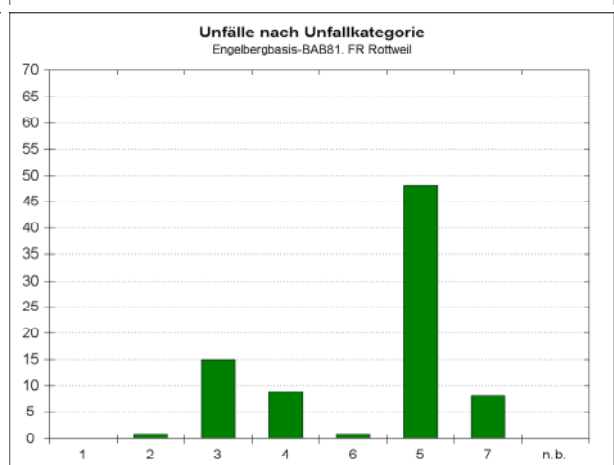
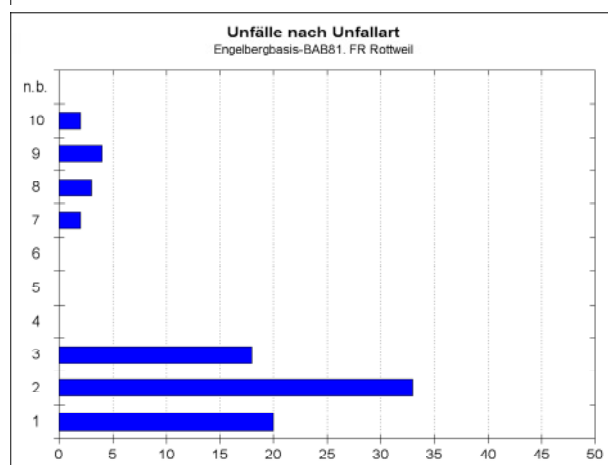
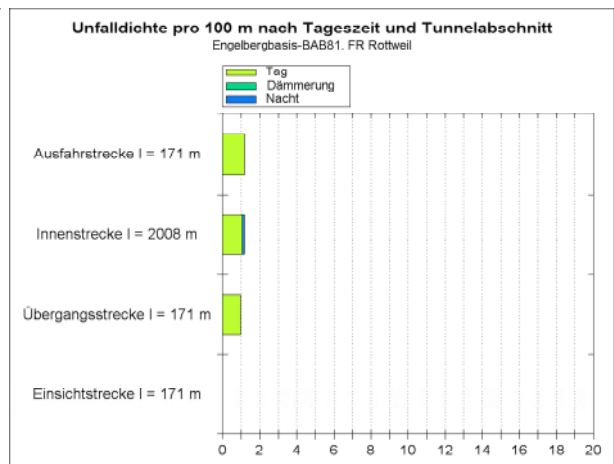
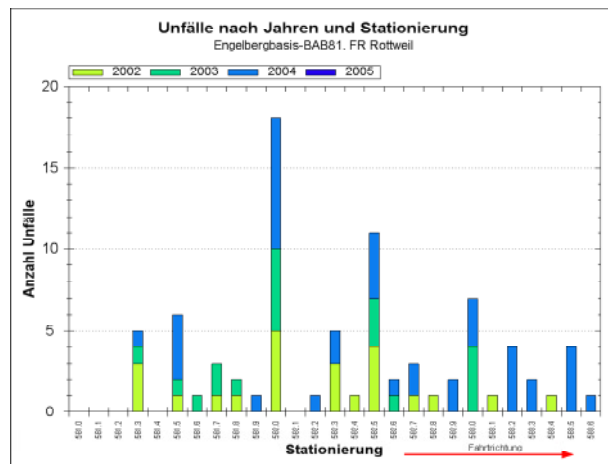
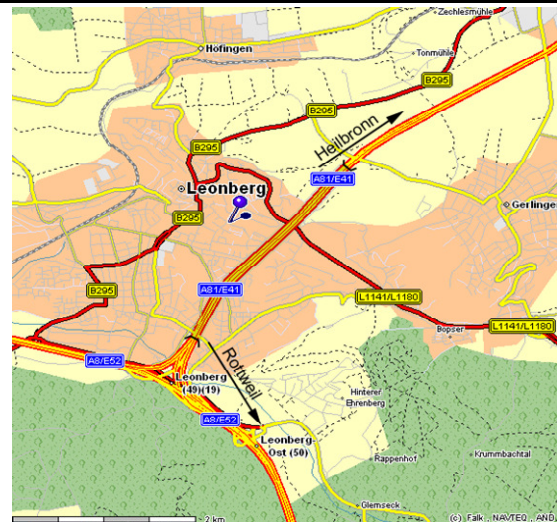
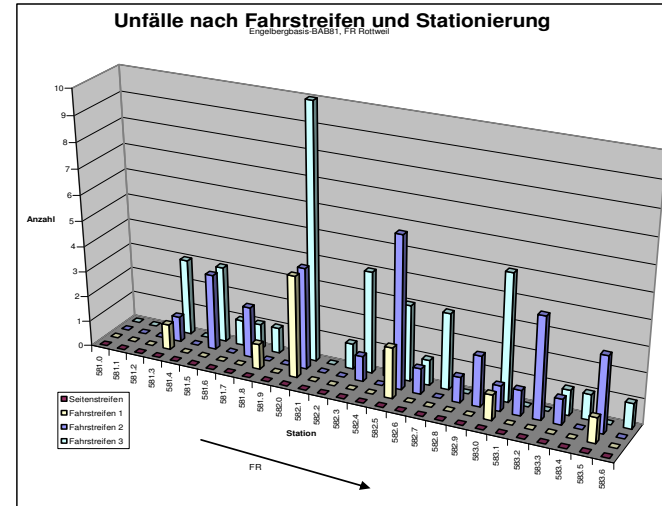
Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

GV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge 600 - 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Rheinland-Pfalz	Barbarossa	Hauptröhre	2	n	790
Baden-Württemberg	Grötzingen	Grötzingen Röhre	2	n	910
Baden-Württemberg	Hugenwald	Hugenwald Röhre	2	n	1.137
Rheinland-Pfalz	Löwenherz	Hauptröhre	2	n	900
Bayern	Riedberg	Riedberg Röhre	2	n	810
Baden-Württemberg	Rombachtal	Rombachtal Röhre	1	n	870
Baden-Württemberg	Schemmelsberg	Schemmelsberg Röhre	2	n	680
Baden-Württemberg	Schlossberg	Schlossberg-Röhre	2	n	830
Bayern	Schwarzer Berg	Schwarzer Berg 1. Röhre	2	n	738
		Schwarzer Berg 2. Röhre	2	n	722
Baden-Württemberg	Sommerberg	Sommerberg Röhre	2	n	1.085
Rheinland-Pfalz	Staufer	Hauptröhre	2	n	1.038
Baden-Württemberg	Ursulabergtunnel	Ursulaberg	2	n	1.180
GV, ohne Zu- / Abfahrten, Länge > 1.200 m					
Bundesland	Tunnelname	Röhre	Anz. Fahrstreifen	Standstreifen	Länge
Baden-Württemberg	Bürgerwaldtunnel	Nord Röhre	2	n	1.435
Hamburg	Elbtunnel	Mittel Röhre 01. Phase	2	n	2.653
		Mittel Röhre 04. Phase	2	n	2.653
		Mittel Röhre 08. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 02. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 04. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 06. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 08. Phase	2	n	2.653
		West Röhre 11. Phase	2	n	2.653
Baden-Württemberg	Gernsbach	Gernsbach Röhre	2	n	1.527
Bayern	Grenztunnel Füssen	Grenztunnel Röhre	2	n	1.271
Baden-Württemberg	Kirchberg	Kirchberg Röhre	2	n	1.840
Baden-Württemberg	Reutherberg	Reutherberg Röhre	2	n	1.262
Baden-Württemberg	Saukopf	Saukopf Röhre	2	n	2.715

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Unfallanalyse für einen Tunnel am Beispiel des Engelbergtunnels

Engelbergbasis-BAB81, FR Rottweil									
berechnete Länge:	2520	V =	100	DTV:	76873	Unfälle Gesamt:	82	Unfälle 2002	23
Länge aus Datenbank:	2530	Sh =	171	SV-Anteil	19,30%	U(P):	16	2003	19
Straßenkategorie	BAB	RQ:	RV	(2000):		U(S):	66	2004	40



Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

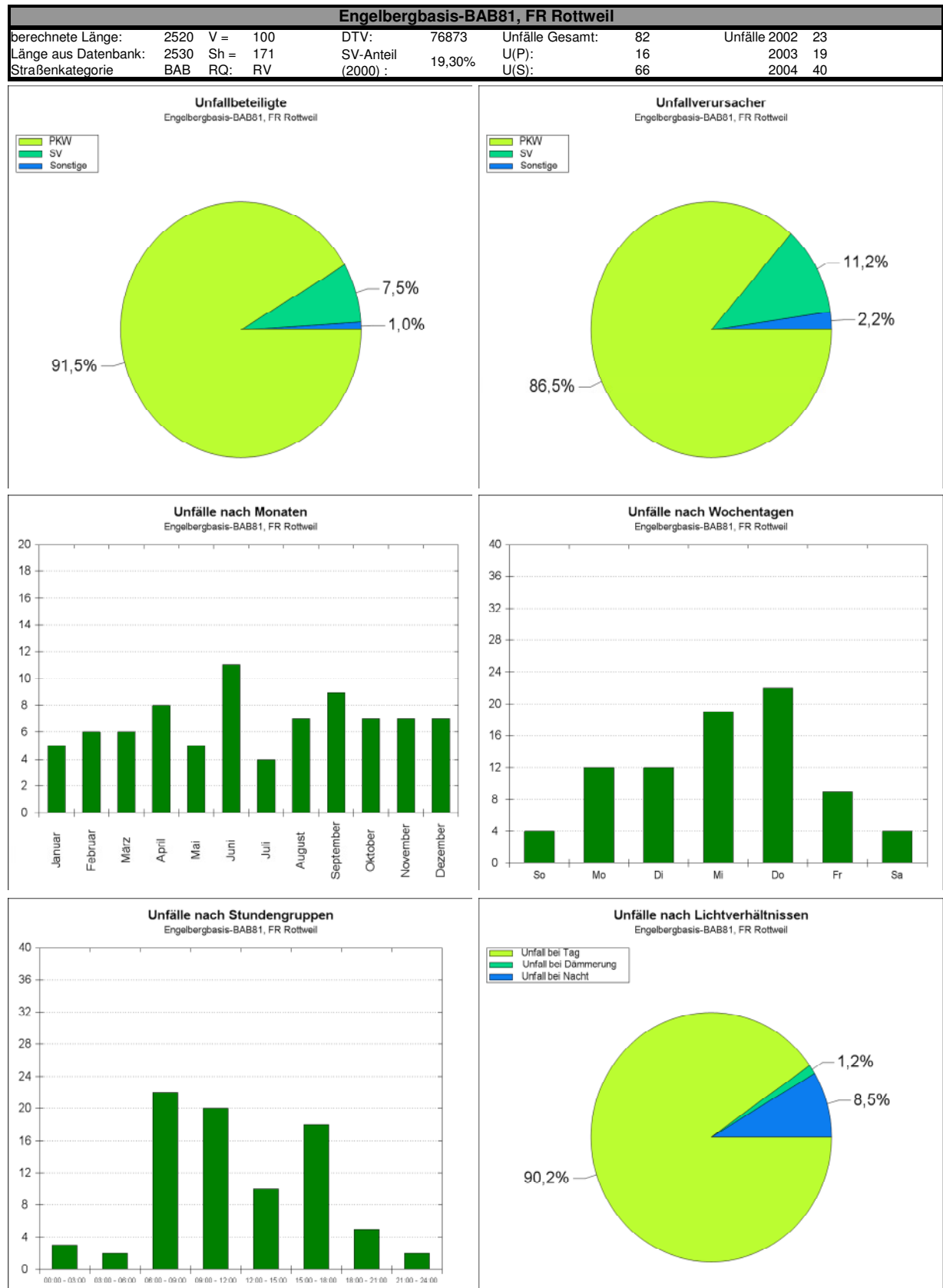


Abbildung 15: Unfallauswertung für Tunnelröhrenrichtung – Beispiel Engelbergtunnel FR Rottweil

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Initialhäufigkeit des Ereignisses Unfall

Die Ergebnisse der Unfallverteilungen streuen innerhalb der betrachteten Tunneltypengruppen erheblich. Für die Ermittlung der mittleren Unfallhäufigkeit wurden die Röhrenrichtungen entsprechend ihrer Betriebsdauer gewichtet gewertet. Zur anschaulichen Darstellung, welche Bandbreite die Streuung hat, sind in Abbildung 16 für Richtungsverkehrstunnel die Unfälle pro Fahrt über die Tunnellänge für jede Tunnelröhrenrichtung aufgetragen. Deutlich hervorgehoben sind die gewichteten Mittelwerte der jeweiligen Klassen. Extremwerte, die über den dargestellten Werten liegen (wie sie beim Elbtunnel in kurzen Betriebsphasen vorkommen) sind jedoch hier nicht sichtbar. Die Anzahl der Datenpunkte sind die berücksichtigten Tunnelröhrenrichtungen, die in der Legende in Klammern aufgeführt sind. Somit ist die Datengrundlage bei Richtungsverkehrstunneln ausreichend um festzustellen, dass die Zahl der Unfälle von der Länge des Tunnels abhängt, diese Längenabhängigkeit jedoch nicht den Proportionalitätsfaktor 1 besitzt. Vielmehr geht die Länge unterproportional in die Initialhäufigkeit Kollision ein. Die gewichteten Mittelwerte der Klassen bilden mit drei Stützpunkten eine hinreichende Basis zur Bestimmung der Faktoren. So beträgt dieser für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrten $2,8 \cdot 10^{-4}$ (Längeneinheit in Meter). Für Richtungsverkehrstunnel mit Zu- und Abfahrten liegt der Wert mit $5,3 \cdot 10^{-4}$ fast doppelt so hoch. Dies resultiert aus dem Verflechtungsverkehr vor Ausfahrten bzw. nach Einfahrten, die zu Auffahrunfällen bzw. seitliche Kollisionen führen.

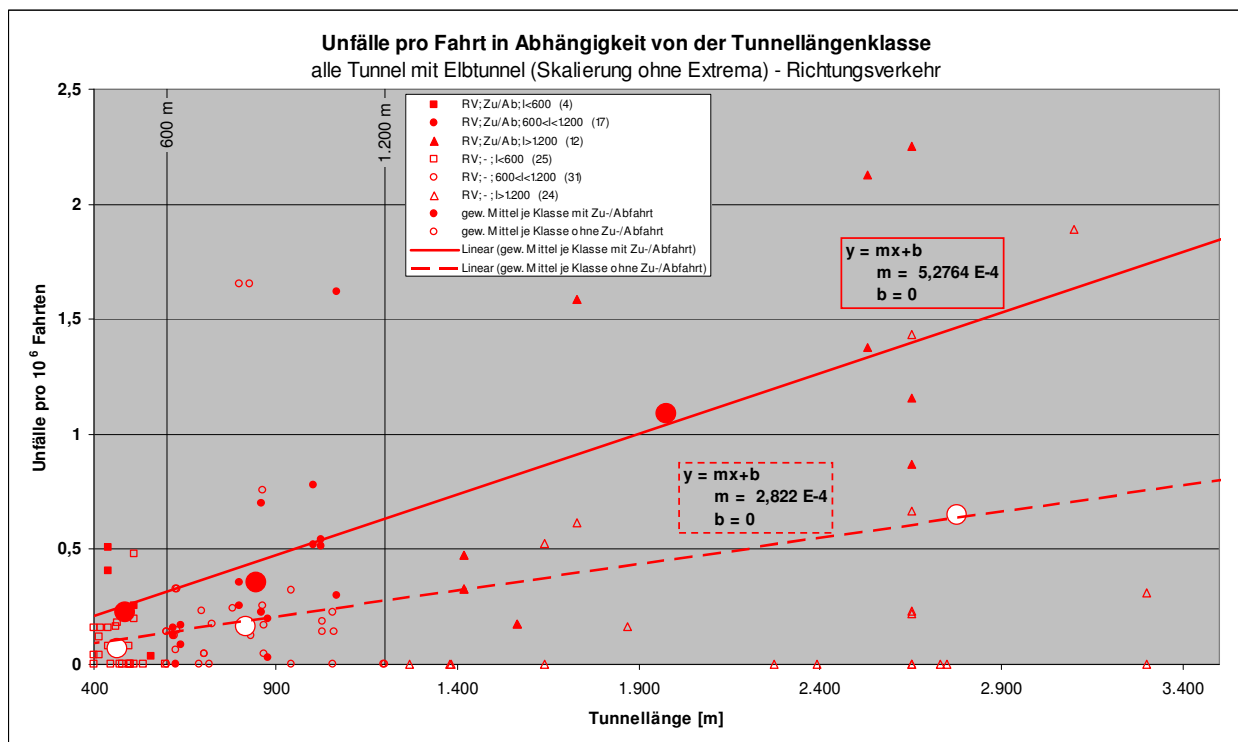


Abbildung 16: Unfälle pro Tunnelfahrt in Abhängigkeit der Längenklasse für Richtungsverkehrstunnel (Einzelpunkte ohne Gewichtung der Betriebsdauer jeder Röhre)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Bei Gegenverkehrstunneln (siehe Abbildung 17) ist die Datengrundlage mit insgesamt vier Stützstellen bei Tunneln mit Zu- und Abfahrten nicht ausreichend. Die Anzahl der entsprechenden Tunnelröhrenrichtungen ohne Zu- und Abfahrten ist jedoch ausreichend groß. Hier wurde zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors ebenfalls ein linearer Trend angenommen, der jedoch aus Plausibilitätsgründen die x-Achse im Nullpunkt schneidet. So ergibt sich ein Faktor von $6,8 \cdot 10^{-4}$. Dieser Wert ist erheblich durch den Elbtunnel bestimmt. Die Datenbasis ist jedoch nicht ausreichend, um eine weitere Differenzierung vorzunehmen, so dass für die Risikoberechnung dieser konservative Wert zugrunde gelegt wird. Qualitativ ist zu vermuten, dass insbesondere Tunnel mit einer mittleren Länge von ca. 700 bis 1.200 m ein vergleichsweise erhöhtes Unfallrisiko haben.

Zur Abschätzung des Proportionalitätsfaktors für Gegenverkehrstunnel mit Zu- und Abfahrten wird angenommen, dass die Differenz zwischen den beiden Tunnelgruppen bei Richtungsverkehrstunneln auf Gegenverkehrstunnel zu übertragen ist. So wird der Proportionalitätsfaktor zu $(6,8+(5,3-2,8)) \cdot 10^{-4} = 9,9 \cdot 10^{-4}$ abgeschätzt.

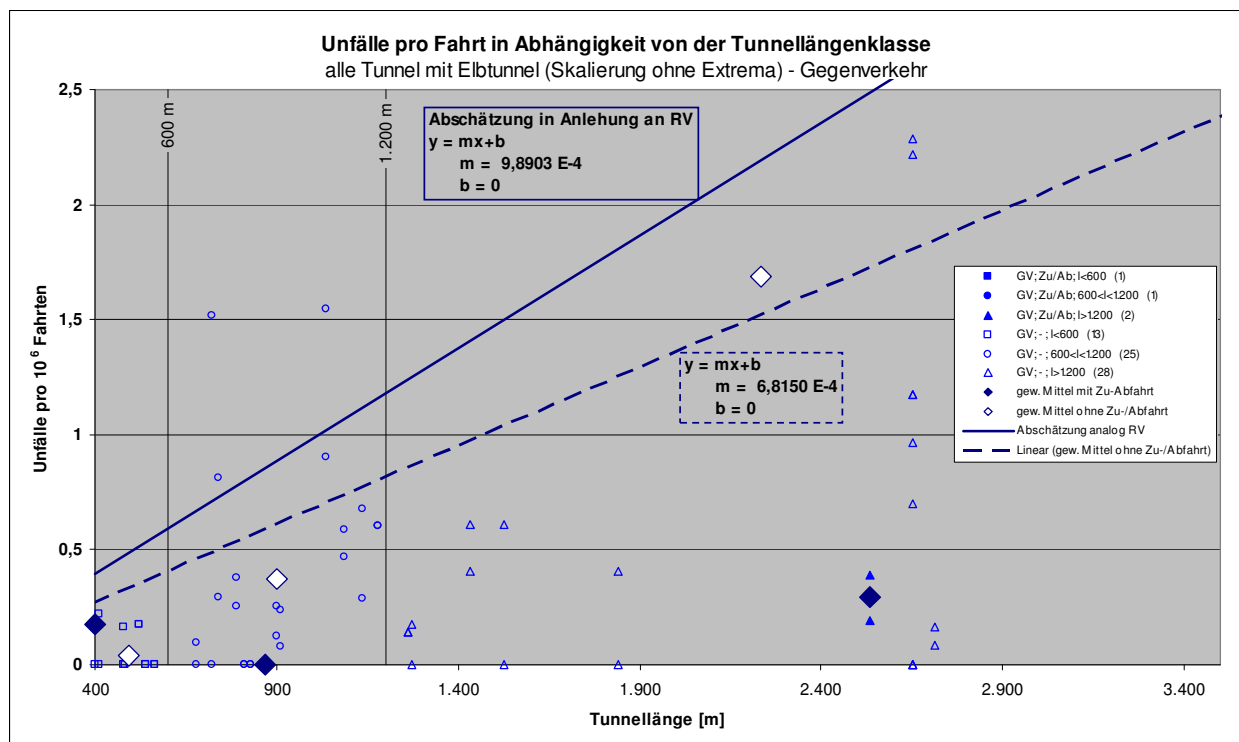


Abbildung 17: Unfälle pro Tunnelfahrt in Abhängigkeit der Längenklasse für Gegenverkehrstunnel (ohne Gewichtung der Betriebsdauer jeder Röhre)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Verzweigungswahrscheinlichkeit Unfalltyp

In Straßentunneln sind ausschließlich die Unfalltypen 1, 3, 6 und 7 zu berücksichtigen. Die Verteilung dieser Unfalltypen in Abhängigkeit der Betriebsart und Tunnellänge ist deutlich ausgeprägt und in der Abbildung 18 dargestellt. Insbesondere eine Längenabhängigkeit ist erkennbar. So nimmt der Anteil von Fahrnfällen und Sonstigen Unfällen mit zunehmender Tunnellänge ab, der Anteil der Unfälle im Längsverkehr dafür zu. Offenbar sind die Unfälle des Typs 1 und 7 besonders im Portalbereich gehäuft und damit annähernd konstant. Mit zunehmender Tunnellänge wird dieser Anteil mit zunehmenden Auffahrkollisionen und Spurwechselfehlern geringer. In kürzeren Richtungsverkehrstunneln mit Zu- und Abfahrten liegt der Anteil ebenfalls durch Auffahrnfälle und Problemen im Verflechtungsbereich höher als bei Richtungsverkehrstunneln ohne dieses Merkmal. Unfälle des Typs 3 sind nur in einer Längenklasse der Richtungsverkehrstunnel in den Verkehrsunfallanzeigen vermerkt. Es ist davon auszugehen, dass Unfälle dieses Typs häufig in den Unfallanzeigen als Unfälle im Richtungsverkehr ausgewiesen werden. Dies war auch mit dem teilweise vorhandenen Text nicht nachvollziehbar. Für Gegenverkehrstunnel mit Zu- und Abfahrten sind die Werte wegen der zu geringen Datenbasis nicht dargestellt.

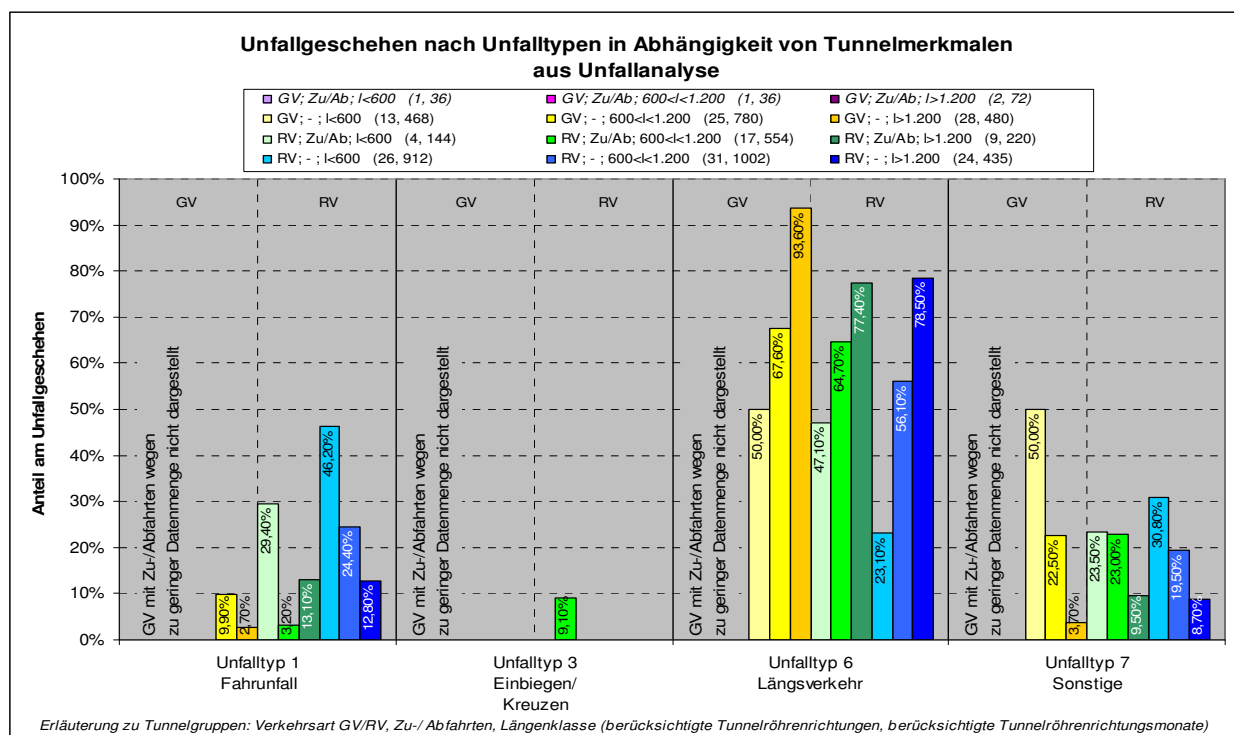


Abbildung 18: Anteil der Unfalltypen am Unfallgeschehen in Abhängigkeit der Tunnelmerkmale

Aus der vorhandenen Unfalltypenverteilung wurde die für die Ereignisbaumanalyse erforderliche Verteilung nach folgendem Modell abgeleitet:

- 1 Unfälle des Typs 3 sind bei Tunneln ohne Zu- und Abfahrten ausgeschlossen, in Tunneln mit Zu- und Abfahrten müssen diese Werte jedoch vorhanden sein.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

- 2 Grundlage für die Herleitung fehlender Werte ist die Unfalltypenverteilung für Tunnel ohne Zu- und Abfahrten, da hier eine große Datengrundlage vorliegt, die wenige Lücken aufweist.
- 3 Die Abschätzung aller fehlenden Daten erfolgt über absolute Unfallzahlen, die für Modelltunnel mit Hilfe der Initialhäufigkeiten (s. o.) bestimmt werden. Dabei werden die gewichteten Tunnellängen der Mittelwerte innerhalb der Klassen vorausgesetzt. Der DTV wird für Gegenverkehrstunnel mit 18.000 Kfz/d und für Richtungsverkehrstunnel mit 50.000 Kfz/d angesetzt. Daraus ergeben sich feste Unfallzahlen für jeden der 12 Tunneltypen, die auf die 4 Unfalltypen verteilt werden.
- 4 Abschätzung der Fahrurfälle für RV ohne Zu- und Abfahrten der mittleren Längenkategorie und GV ohne Zu- und Abfahrten von kurzer Länge: Diese werden als konstant angenommen und ergeben sich aus dem Mittelwert der beiden anderen Längenkategorien. Um diesen Wert werden die Unfälle des Typs 7 reduziert und liegen damit ebenfalls nahezu in einem konstanten Bereich.
- 5 Abschätzung Unfalltyp 3 für RV mit Zu- und Abfahrten: Annahme, dass diese Anzahl wegen Singularitäten unabhängig von der Länge ist und die Unfallzahl für alle Längenkategorien derjenigen der Längenkategorie $600 < l < 1200$ entspricht.
- 6 Annahme, dass die Anzahl der Unfälle des Typs 1 und 7 unabhängig von Zu-/Abfahrten sind, d. h. die Werte für alle Längenkategorien werden aus der Tunnelgruppe RV ohne Zu- und Abfahrten übernommen.
- 7 Die Unfallzahlen des Typs 6 ergeben sich nun in den Längenkategorien aus der Differenz, da alle anderen Häufigkeiten der Unfalltypen bestimmt sind.
- 8 Analog zu Schritt 5 wird der Typ 3 für GV mit Zu- und Abfahrten unter der Annahme, dass die Anzahl unabhängig von Länge und Tunneltyp ist mit den Unfallzahlen des Tunneltyps RV mit Zu- und Abfahrten bestimmt.
- 9 Analog zu Schritt 6 wird die Anzahl der Unfälle der Typen 1 und 7 für GV mit Zu- und Abfahrten als von den Zu-/Abfahrten unabhängig angenommen, die Werte somit für alle Längenkategorien aus GV ohne Zu- und Abfahrten übernommen.
- 10 Analog zu Schritt 7 ergeben sich nun die Unfallzahlen des Typs 6 für GV mit Zu- und Abfahrten in allen Längenkategorien aus der Differenz.

Die endgültige Verteilung der Unfalltypen in Abhängigkeit der Tunneltypen und Längen ist in Abbildung 19 dargestellt. Im Vergleich mit der Statistik (Abbildung 18) zeigt sich, dass die Charakteristik der vorhandenen Werte nicht verändert ist. Unplausibilitäten und fehlende Werte konnten mit dem angewendeten Modell gut bereinigt bzw. ergänzt werden.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

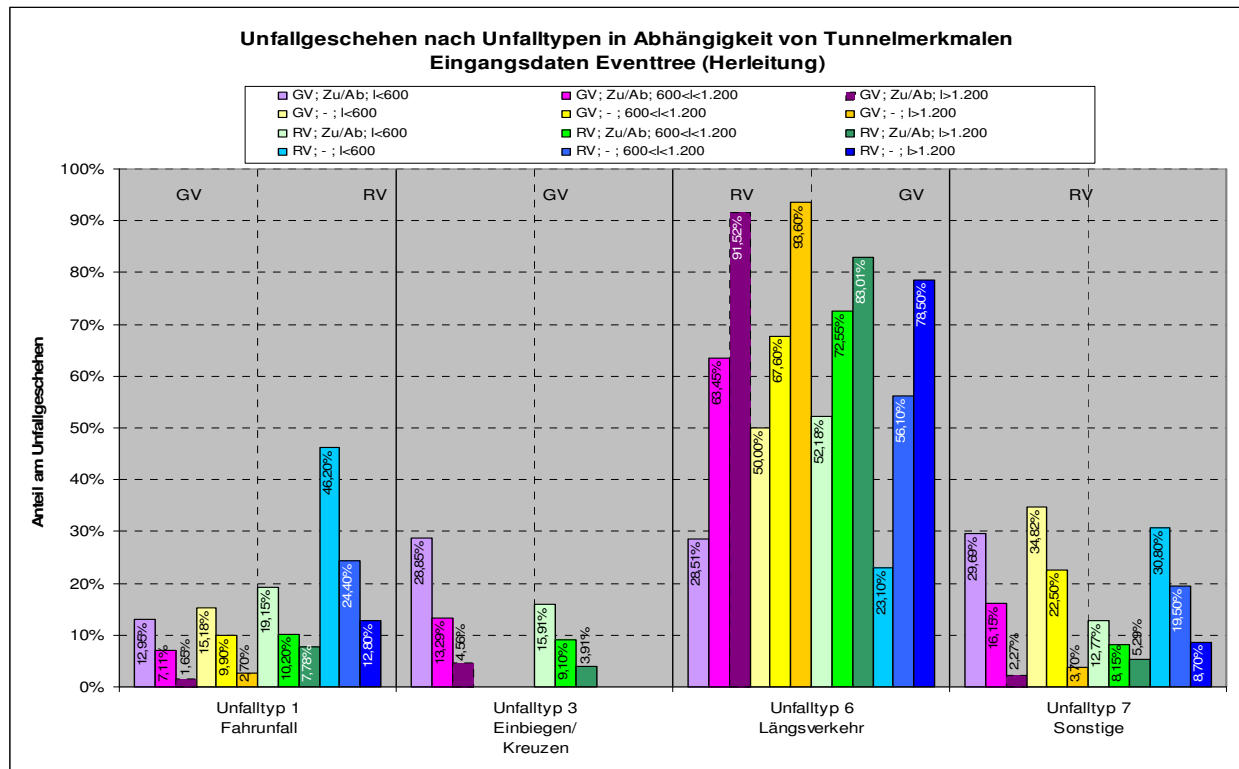


Abbildung 19: Eingangswerte für die Risikoberechnung – Verzweigungspunkt Unfalltypenverteilung in Abhängigkeit der Tunnelmerkmale

Schadensausmaß Kollision, Verteilung nach Unfalltypen

Für die Berechnung des Schadensausmaßes bei Kollision dienen als Grundlage die Kostensätze der Abbildung 20 nach den Empfehlungen für das Sicherheitsaudit von Straßen ESAS (Preisstand 2000), die der in der Verkehrsunfallanzeige vermerkten Unfallkategorie zugeordnet sind.

Unfallkategorie (Schwerste Unfallfolge)	Kostensätze für Sachschaden WUS [€/U]				
	außerorts		innerorts		
	Autobahn* (1)	Landstraße** (2)	Verkehrstr. (3)	Erschl.straße (4)	Gesamt (5)
SP: Unfall mit Getöteten oder Schwerverletzten	45.500	17.000	8.500	5.000	6.500
LV: Unfall mit Leichtverletzten	25.500	13.000	8.000	5.500	6.500
P: Unfall mit Personenschaden	31.000	14.500	6.500	5.500	6.500
SS: Schwerwiegender Unfall mit Sachschaden	18.500	13.000	12.000	11.500	11.500
LS: Sonstiger Unfall mit Sachschaden	8.000	6.000	6.000	5.500	5.500
S: Unfall mit Sachschaden	10.500	7.000	6.500	5.500	6.000

Schwere der Verletzung	Kostensatz WV [€/Pers.]
GT: Getötet	1.250.000
SV: Schwerverletzt	85.000
LV: Leichtverletzt	3.750

Abbildung 20: Kostensätze für Sachschäden und Verletzte nach ESAS (Preisstand 2000)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

In der Abbildung 21 ist die Verteilung der Schadenhöhe für Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunnel in Abhängigkeit des Unfalltyps zu entnehmen. Die Grenzen wurden so gelegt, dass unter 8.000 € alle Unfälle mit leichten Sachschäden aber ohne Personenschaden erfasst werden. Die Schadensklasse 8.000 – 30.000 € enthält schwere Sachschäden sowie Unfälle mit Leichtverletzten. Die Schadensklasse 30.000 – 150.000 € beinhaltet Unfälle mit einem Schwerverletzten. Die beiden letzten Klassen sind für noch schwerere Unfälle mit mehreren Schwerverletzten vorgesehen.

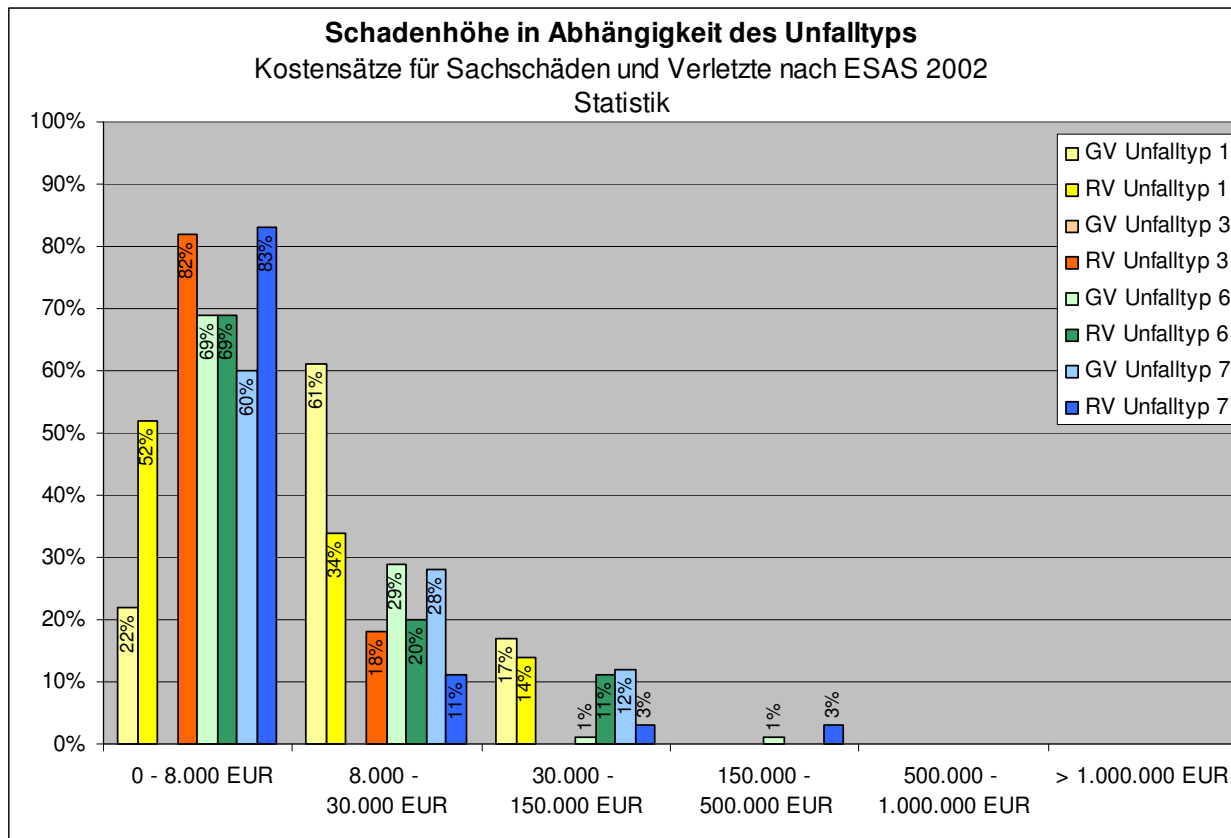


Abbildung 21: Schadenhöhe aller betrachteten Unfälle nach Verkehrsart und Unfalltyp

Folgende Tendenzen sind daraus zu entnehmen:

Unfalltyp 1: Fahrnfälle in Gegenverkehrstunneln sind tendenziell schwerer als in Richtungsverkehrstunneln.

Zum Unfalltyp 3 können keine Tendenzen abgeleitet werden, da Unfalldaten zu diesem Typ in GV-Tunneln nicht vorliegen. Für die Besetzung dieser Werte im Rahmen der Risikoberechnung wird davon ausgegangen, dass diese Unfälle durch eine mögliche Einbeziehung des Gegenverkehrs zu einer erhöhten Unfallschwere führen.

Unfalltyp 6: Hier zeigt sich eine leichte Tendenz, dass Unfälle im Längsverkehr bei RV-Tunneln schwerer sind.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Unfalltyp 7: Bei den sonstigen Unfällen sind tendenziell in GV-Tunneln schwerer Unfallfolgen zu verzeichnen als in RV-Tunneln.

Auf Basis der vorliegenden Daten wurde die in Abbildung 22 dargestellten Häufigkeitsverteilung als Eingangswert für die Risikoberechnung abgeleitet.

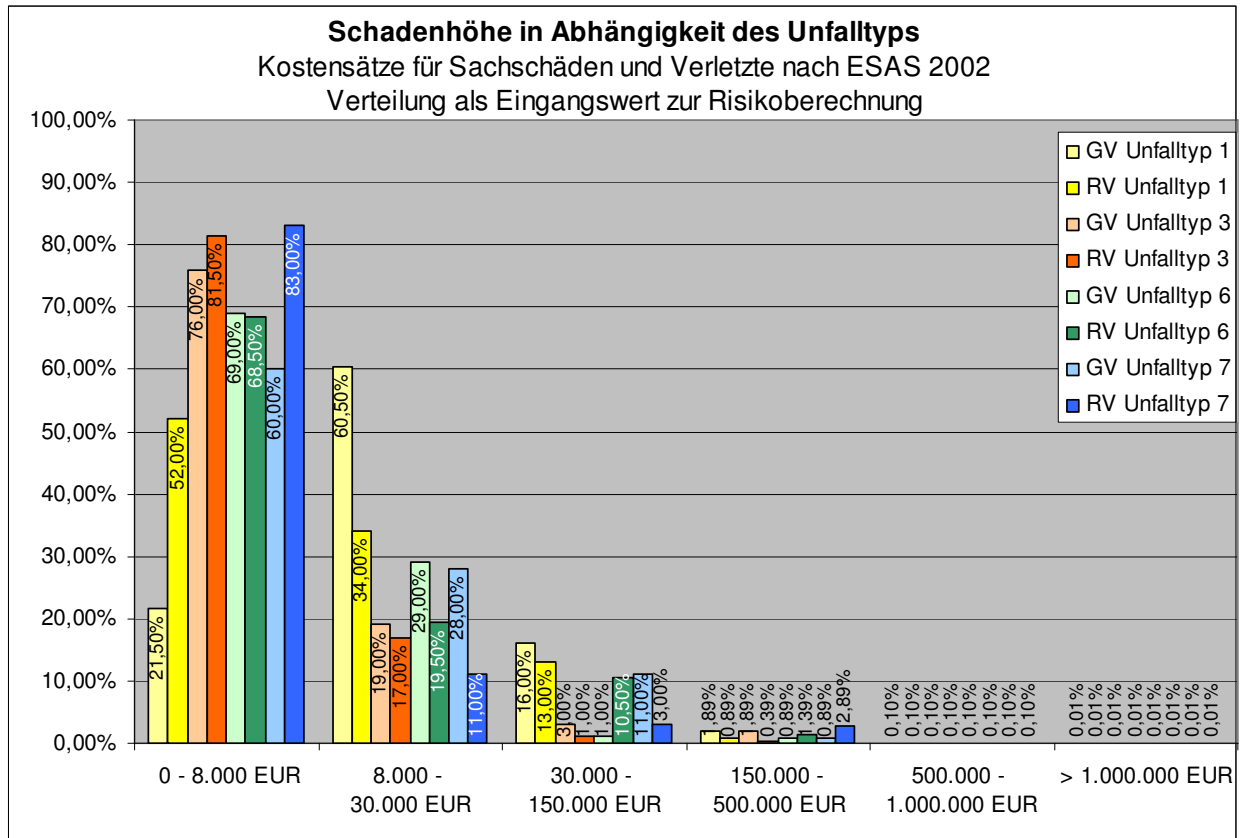


Abbildung 22: Verteilung der Schadenhöhe nach Verkehrsart und Unfalltyp als Eingangswert für die Risikoberechnung

Anhang 8 Risikobewertung

Ausgangslage

Die Sicherheit von technischen Systemen wie Straßentunneln hat in der Vergangenheit stark an Bedeutung gewonnen. Die Auseinandersetzung mit Sicherheitsfragen und Risiken auf einer technisch-analytischen Ebene – nicht nur im Bereich der Straßentunnelsicherheit – führt stets zur Erkenntnis, dass damit immer und in vielfältiger Weise auch Wertungsfragen verbunden sind: Eine wissenschaftliche Antwort auf die Frage, was ein ausreichendes Maß an Sicherheit ist, gibt es ebenso wenig, wie eine eindeutige Definition, was als Schaden oder Risiko bezeichnet werden soll. Risiken werden erfahrungsgemäß durch die Gesellschaft je nach Art und Ausprägung unterschiedlich wahrgenommen.

Zum Instrument der Risikoanalyse und der sicherheitstechnischen Optimierung von Systemen liegen heute weitgehend gefestigte Kenntnisse, Grundlagen, objektivierbare methodische Ansätze und praktische Erfahrungen aus zahlreichen (vornehmlich technischen) Bereichen vor. Die Risikobewertung hingegen basiert nicht zuletzt auf subjektiven Einschätzungen und Beurteilungen von Risiken und ist ein multi- und interdisziplinärer Forschungsgegenstand, zu dem eine Vielzahl von Beiträgen und Ansätzen aus verschiedenen Disziplinen existiert.

Grundfrage der Risikobewertung

Der Ablauf der vorgeschlagenen Sicherheitsbewertung basierte auf einer Ereignisbaumanalyse. Die ermittelten Risiken können zum einen als Risikokenngröße oder in Form von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ausgewiesen werden. Die Frage, welche Risiken akzeptiert bzw. nicht akzeptiert werden, ist damit aber noch nicht beantwortet. Die Frage "Welche Risiken werden in Kauf genommen und damit als tragbar erachtet?" ist deshalb im Rahmen der Risikobewertung explizit zu beantworten. Analog zur Quantifizierung der Risiken wird dabei eine eindeutige Aussage über die verbleibenden Risiken und deren Tragbarkeit verlangt. Als Basis für die Risikobewertung wird davon ausgegangen, dass ein der RABT 2006 entsprechender Tunnel als sicher erachtet wird.

Im Gegensatz zur Risikoanalyse enthält die Risikobewertung definitionsgemäß eine subjektive Beurteilung. Sie kann somit auch nicht mehr eine Domäne von Fachleuten sein, sondern spricht den unmittelbar betroffenen Entscheidungsträger, im umfassenden Sinn den Gesetzgeber und damit letztlich die Gesellschaft als Ganzes an.

Obwohl die Risikobewertung subjektive Elemente enthält, bedeutet dies nicht, dass weniger hohe Anforderungen an die Transparenz, Einheitlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Bewertungsmethodik gestellt werden sollen. Wenn Risiken quantitativ ermittelt werden, liegt es nahe, sie auch anhand quantitativer Kriterien zu beurteilen. Eine umfassende und aufwendige Risikoanalyse ist wenig sinnvoll, wenn anschließend mehr oder weniger intuitiv über zu treffende Maßnahmen entschieden wird. Zudem gilt es, zwischen der Beurteilungsmethodik und der

zahlenmäßigen Festlegung der verwendeten Beurteilungskriterien zu unterscheiden. Während die Methodik strengen logischen Anforderungen zu genügen hat, ist die zahlenmäßige Festlegung der Kriterien subjektiv und kann nur im Konsens der Beteiligten erfolgen.

Auf qualitativer Ebene ist es vergleichsweise einfach, konsensfähige Zielvorstellungen zu entwickeln. Sie könnten beispielsweise wie folgt formuliert werden: „Es sind all die Maßnahmen zu treffen, die geeignet sind, Personen (z. B. Tunnelbenutzern) einen hinreichenden Schutz zu gewähren und die Gesellschaft als Ganzes vor übermäßigen Schäden zu bewahren. Die Maßnahmen müssen zudem wirtschaftlich tragbar sein.“ Im ersten Teil geht es um den Grundsatz von Sicherheit, im zweiten Teil um die Verhältnismäßigkeit. Die Umsetzung solch generell formulierter Zielsetzungen ist in verschiedenen Ländern mit unterschiedlichen Ansätzen angegangen worden. Insbesondere Länder mit einer längeren Tradition quantitativer Risikoanalysen haben sich intensiv mit entsprechenden Beurteilungskriterien befasst. Allerdings gibt es bisher kein allgemein anerkanntes Vorgehen.

Risikokategorien

Je nach Risikosituation ist die Bereitschaft von Individuum und Gesellschaft sehr unterschiedlich, Risiken zu akzeptieren. Aus diesem Grund ist es problematisch, Risikowerte unterschiedlicher Systeme und Aktivitäten undifferenziert miteinander zu vergleichen. Die Risikobewertung muss diesem Aspekt Rechnung tragen. Das nachfolgende Beispiel in Abbildung 23 soll dies veranschaulichen: In beiden aufgeführten Zeitungsschlagzeilen wird über Bahnunfälle berichtet, in welchen jeweils eine Person ums Leben kam. Dennoch werden die beiden Ereignisse unterschiedlich bewertet.



Abbildung 23: Beispiel unterschiedlicher Risikokategorien

Es ist hinlänglich bekannt, dass Menschen im Allgemeinen bereit sind, umso höhere Risiken zu akzeptieren, je besser sie mit ihnen vertraut sind, je freiwilliger sie diese eingehen und je direkter die Nutzenempfindung aus der risikobehafteten Tätigkeit ist. Im Sinne eines Modells kann diese Beobachtung durch so genannte Risikokategorien abgebildet werden. Vereinfachend werden dabei zwei Faktoren berücksichtigt:

- Für die Akzeptanz von Risiken ist es wichtig, inwieweit risikobehaftete *Tätigkeiten selbst- bzw. fremdbestimmt* sind. Dahinter stecken drei Einflüsse:

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

1. Die Kenntnis des Risikos – "Womit muss ich rechnen?" Sind die Risiken einer Tätigkeit bekannt und vertraut, und eine Person ergreift sie trotzdem, kann eine hohe Risikoakzeptanz angenommen werden.
 2. Die Vermeidbarkeit – "Gibt es eine sicherere Alternative?" In ähnlicher Weise ist die Risikoakzeptanz hoch, wenn sicherere Alternativen bestehen und bekannt sind, aber der risikoreichere Weg gewählt wird.
 3. Die Beeinflussbarkeit – "Lässt sich die Höhe des Risikos durch das Verhalten selbst steuern?" Je stärker das Risiko einer Tätigkeit auch persönlich beeinflussbar ist, desto höher ist die Risikoakzeptanz.
- Ein weiterer Aspekt ist die *Nutzenempfindung*. Sie ist dort am größten, wo eine Tätigkeit direkt der persönlichen Befriedigung dient (z. B. Freizeitaktivität), und dort am geringsten, wo man keinen Nutzen für sich erkennen kann und vielleicht sogar den Nutzen für die Gesellschaft in Frage stellt (z. B. Endlager für radioaktive Abfälle).

Die beiden Faktoren erlauben es, Tätigkeiten bzw. Risiken bezüglich ihrer Risikoakzeptanz einzustufen. Dies kann anhand von vier Risikokategorien erfolgen, wie sie in Abbildung 24 dargestellt sind.

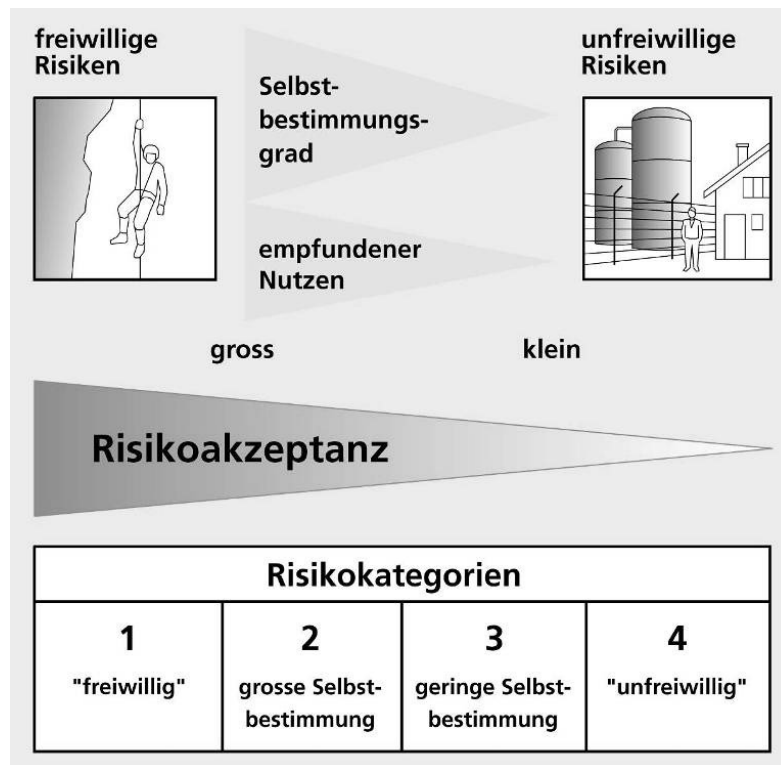


Abbildung 24: Einteilung der Risiken in Risikokategorien

Die Risikokategorie 1 enthält Risiken mit hoher Akzeptanz: Vereinfachend gesagt, sind es freiwillig eingegangene Tätigkeiten und Risiken, aus denen die Person einen hohen Nutzen für sich selbst zieht. Am anderen Ende steht die Risikokategorie 4: Die betroffene Person kann die Risiken weder beeinflussen noch empfindet sie einen Nutzen aus der Tätigkeit.

Aktivitäten im Straßenverkehr werden gewöhnlich der Risikokategorie 2 (große Selbstbestimmung) zugeordnet. Im Zusammenhang mit dem Aspekt der Tunnelsicherheit drängt sich im vorliegenden Kontext eine Unterscheidung der Risikokategorien für die verschiedenen Szenariotypen auf: Während Szenarien des Typs "Kollision" stärker durch das Verhalten der Verkehrsteilnehmer beeinflusst werden können, ist der Grad der Selbstbestimmung beim Szenario "Brand" weitaus geringer, da hier auch Verkehrsteilnehmer betroffen sein können, welche keinen direkten Einfluss auf die Situation bzw. den Ereignisablauf haben. Es wird deshalb vorgeschlagen, den beiden Szenariotypen eine unterschiedliche Einstufung der Risikokategorien zugrunde zu legen: Kollisionen werden der Risikokategorie 2, Brände der Risikokategorie 3 zugeordnet.

Bewertungsarten

Die Bewertung von Risiken kann aus folgenden Blickwinkeln erfolgen:

- Bewertung aus Sicht der individuellen Risiken
- Bewertung aus Sicht der kollektiven Risiken

Individuelle Risiken

Die Bewertung von individuellen Risiken verfolgt das Ziel des Schutzes des Individuums vor einem übermäßigen bzw. als nicht tragbar beurteiltem Risiko. Üblicherweise wird bei der Festlegung von Grenzwerten die durchschnittliche Sterbewahrscheinlichkeit eines Menschen als Bezugsgröße herangezogen. Der Grundgedanke bei der Festlegung der Grenzwerte ist, dass keine Person durch ein System oder eine Aktivität eine maßgebliche Erhöhung der durchschnittlichen Sterbewahrscheinlichkeit erfährt, sofern sie dieses Risiko nicht bewusst bzw. freiwillig eingeht. Je nach Grad der Freiwilligkeit bzw. Beeinflussbarkeit des Risikos (Risikokategorie) können unterschiedliche Grenzwerte festgelegt werden.

Anwendung findet die Bewertung auf Basis von individuellen Risiken, v.a. in den Fällen, in welchen Personen über eine längere Zeitspanne bedingt freiwillig bzw. unfreiwillig einer Gefährdung ausgesetzt sind (Risikokategorien 3 und 4). Beispiele hierzu finden sich u.a. in den Niederlanden, Großbritannien, Ungarn oder der Tschechischen Republik, wo Grenzwerte für individuelle Risiken definiert sind, um die Tragbarkeit der Risiken, welche von neuen oder bestehenden Anlagen (Fabrikationsanlagen u. Ä.) ausgehen, zu beurteilen bzw. den Handlungsbedarf hinsichtlich zusätzlicher Sicherheitsmassnahmen zu ermitteln.

Eine Bewertung der individuellen Risiken im Straßenverkehr erfolgt vereinzelt. Für die Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln ist die Kenngröße des individuellen Risikos aber wenig geeignet. Grund dafür ist die Tatsache, dass sich ein Verkehrsteilnehmer i. d. R. nur während einer kurzen Zeitspanne im Tunnel aufhält und damit seine durchschnittliche Sterbewahrscheinlichkeit nicht maßgeblich erhöht wird.

Kollektive Risiken

Risikoaversion

Der Gesamtschaden, der durch Unfälle oder Brandereignisse in einem Straßentunnel entstehen kann, lässt sich durch das kollektive Risiko ausdrücken. Dieser Wert entspricht dem statistischen Schadenerwartungswert (z. B. statistisch erwartete Zahl der Todesopfer pro Jahr). Die Erfahrung (insbesondere jene im Zusammenhang mit dem Umgang mit potenziellen Großereignissen) zeigt, dass kollektive Risiken dabei nicht alleine aufgrund ihrer Größe beurteilt werden, sondern dass auch die Größe der möglichen Schadenausmaße eine wichtige Rolle spielt. Hierbei zeigt sich, dass Szenarien, für welche identische kollektive Risiken und damit auch gleich statistische Schadenerwartungswerte ausgewiesen werden, anders beurteilt werden, wenn sich Ihre Schadenausmaße deutlich unterscheiden. Die nachfolgende Abbildung 25 soll dies beispielhaft illustrieren.



Abbildung 25: Signalwirkung eines großen Unfalls

Die beiden Beispiele in Abbildung 25 zeigen, dass das kollektive Risiko bzw. der statistische Schadenerwartungswert alleine nicht das geeignete Maß darstellen, um die Risiken so zu beurteilen, wie sie in der Gesellschaft wahrgenommen werden. Erfahrungsgemäß rufen Unfälle mit großen Auswirkungen in der Gesellschaft ungleich stärkere Reaktionen hervor, als eine große Anzahl kleiner Unfälle mit insgesamt demselben Schadenausmaß. Großunfälle haben neben den direkten Schäden zudem meist auch größere indirekte Schäden zur Folge. Normalerweise werden in Risikoanalysen in erster Linie direkte Schäden erfasst, weitere Folgeschäden aber nicht explizit berücksichtigt.

Die spezielle Gewichtung von Großereignissen sowie nicht direkt erfasster indirekter Schäden kann über die so genannte *Risikoaversion* berücksichtigt werden. Neben den beschriebenen Risikokategorien stellt die Risikoaversion die zweite Schlüsselgröße zur Risikobewertung dar. Sie ist ein in der mathematischen Entscheidungstheorie bekanntes Phänomen, so dass Ansätze aus diesen Bereichen übernommen werden können. Konkret bedeutet Risikoaversion, dass das "effektive" Schadenausmaß eines Unfalls zusätzlich gewichtet wird und zwar mit zunehmender Größe des Schadenausmaßes. Ein Schadenausmaß von beispielsweise 10 Todesopfern wird dann so behandelt, als habe es einen Wert von $\varphi \cdot 10$ Todesopfern. Dabei entspricht φ einem Aversionsfaktor, der von der Höhe des Schadenausmaßes abhängig ist.

Für kollektive, mit einem Aversionsfaktor gewichtete Risiken, wird die Bezeichnung bewertetes (oder "empfundenenes") kollektives Risiko R_e verwendet. Es bringt zum Ausdruck, dass es sich um eine teilweise subjektive Größe handelt.

Die nachfolgende Abbildung 26 zeigt verschiedene Aversionsfaktoren, wie sie in der Praxis zur Anwendung kommen.

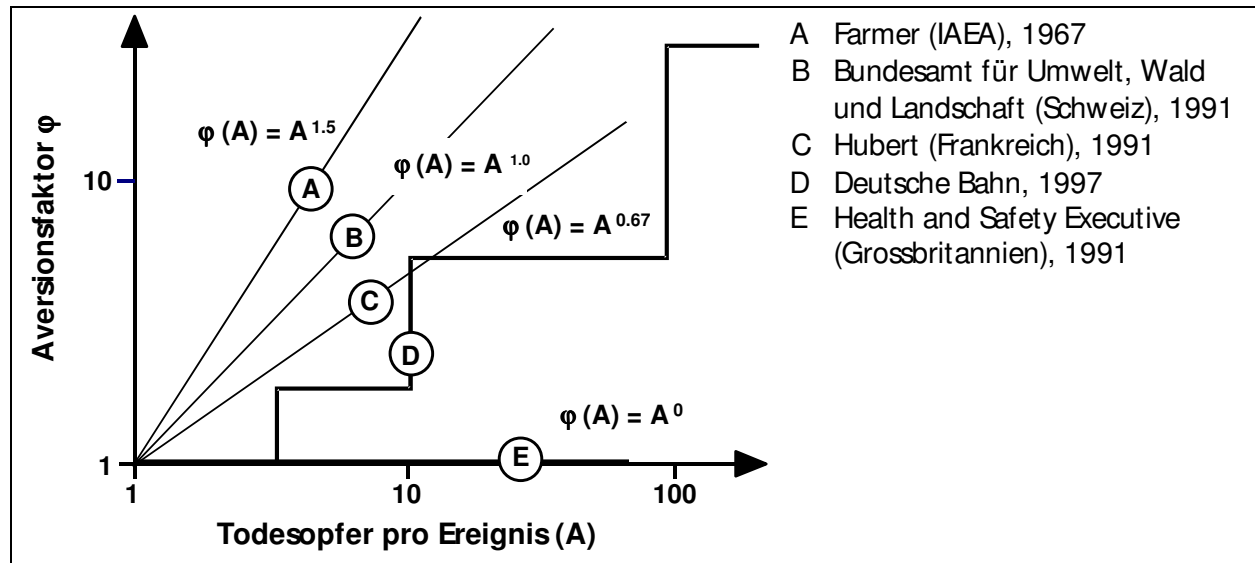


Abbildung 26: Beispiele von Aversionsfunktionen

Nahe liegend ist es, Grenzwerte für ein maximal als akzeptabel bewertetes kollektives Risiko festzulegen. Diese Überlegung ergibt bei vertiefter Betrachtung aber auch gewisse Schwierigkeiten. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass die Systemgröße direkt ins kollektive Risiko einfließt. Grosse Systeme produzieren große Risiken – kleine Systeme kleine Risiken. Eine sinnvolle Bezugsgröße fehlt. Sofern man also nicht für jedes System und jede Fragestellung fallweise einen Grenzwert mehr oder weniger willkürlich definieren will, muss eine andere Bewertungsgröße herangezogen werden, die frei von der Art und Dimension des Systems ist. Dennoch ist eines der in der Praxis am weitesten verbreiteten Verfahren die Bewertung mittels Akzeptanzbereichen im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm. Praktische Beispiele für diese Anwendung finden sich beispielsweise in den Niederlanden, Großbritannien oder der Schweiz.

Grenzkosten / Kosten-Wirksamkeit

Wie die Erfahrung zeigt, werden in der Praxis die Sicherheitsbemühungen zur Minderung der Risiken, welche von einem System oder einer Anlage ausgehen, stets bis zu einem gewissen Punkt vorgenommen. Damit wird deutlich, dass der Aufwand für Sicherheitsmaßnahmen und die als akzeptabel beurteilten Risiken in einem direkten Zusammenhang stehen. Diese Beziehung zwischen Maßnahmen, deren Kosten und der Risikominderung lässt sich in einem Diagramm mit den beiden Achsen „Risiko“ und „Kosten“ aufzeigen, wie aus Abbildung 27 ersichtlich ist.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

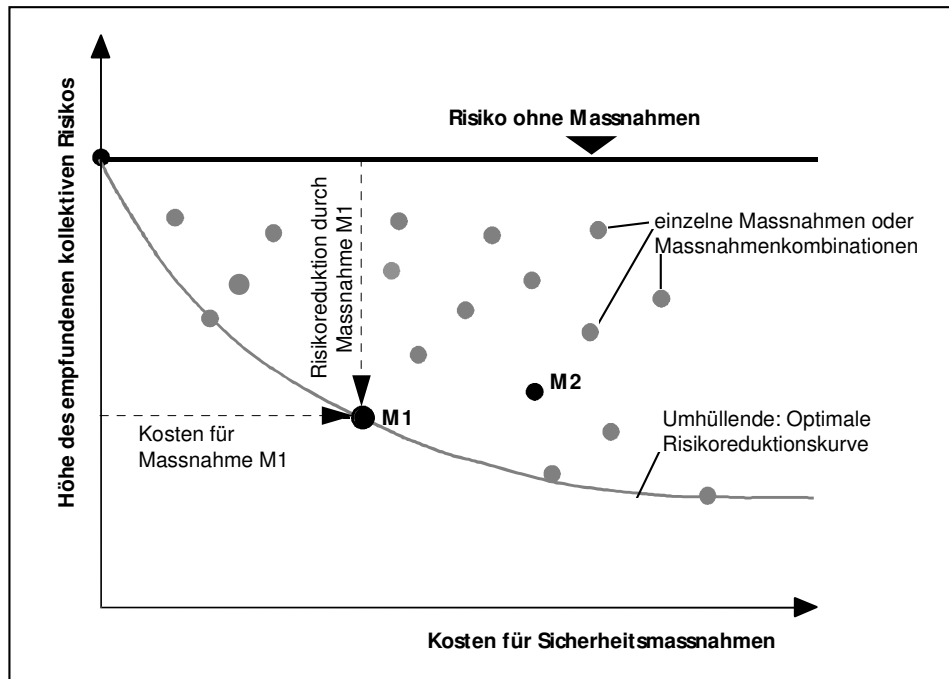


Abbildung 27: Risikominderung und Kosten für zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen

Jede Sicherheitsmaßnahme bzw. deren Kostenfolgen und ihre risikomindernde Wirkung lässt sich als Punkt im Diagramm in Abbildung 27 darstellen.

Werden *alle* Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen im Diagramm eingetragen, entsteht eine Punktwolke. Sie kann durch eine Linie umfasst werden, so dass keine Maßnahme oder Kombination unterhalb der Linie liegt. Diese untere Umhüllende hat eine spezielle Bedeutung: Alle Maßnahmen, die auf der Linie liegen, sind aus Sicht der Kosten und der Wirksamkeit optimal, denn es gibt keine andere Maßnahme, die für den gleichen Geldbetrag das Risiko stärker reduziert. Beispiel (vgl. Abbildung 27): Die Maßnahme M1 liegt auf der Umhüllenden. Mit kleineren Kosten wird eine größere Risikoreduktion erreicht als beispielsweise mit der Maßnahme M2. Typischerweise wird die Kurve mit zunehmendem Sicherheitsaufwand immer flacher, ihre Steigung erreicht aber nie Null, es sei denn, die Aktivität wird aufgegeben und somit das Risiko eliminiert. Damit wird deutlich, dass die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen bei abnehmendem Risiko immer schlechter wird. Gleichzeitig nimmt der Aufwand für eine weitere Risikoreduktion zu.

Es stellt sich die Frage, bis zu welchem Punkt auf der Umhüllenden die Risiken zu reduzieren bzw. zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen sind. Die Antwort lautet: Bis zu derjenigen Maßnahme, bei welcher Aufwand und Sicherheitszuwachs gerade noch in einem vorgegebenen, als angemessen erachteten Verhältnis stehen. Für diesen Grenzwert der Kosten-Wirksamkeit wird der Begriff "Grenzkosten" verwendet. Der Begriff stammt aus der Ökonomie und entspricht denjenigen Kosten, die beispielsweise durch die Produktion einer zusätzlichen Einheit entstehen. Bei der Beurteilung von Sicherheitsmaßnahmen entspricht dies sinngemäß

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

nicht den Kosten zusätzlicher Produktionseinheiten, sondern den Kosten für eine zusätzliche Risikoreduktion.

Die Grenzkosten sind ein Maß für die Zahlungsbereitschaft, um Risiko reduzierende Maßnahmen zu ergreifen. Über die Grenzkosten wird somit explizit festgelegt, welche Maßnahmen noch als sinnvoll erachtet werden und welche nicht mehr. Damit legen die Grenzkosten quantitativ die Verhältnismäßigkeit fest. In Abbildung 28 stellt die Maßnahme M1 das optimale Maßnahmenpaket dar. Das Verhältnis von Kosten und Wirksamkeit entspricht gerade demjenigen der Grenzkostengeraden. M0 ist nicht ausreichend, während M3 aufgrund der vorangehenden Festlegungen als unverhältnismäßig bezeichnet werden muss.

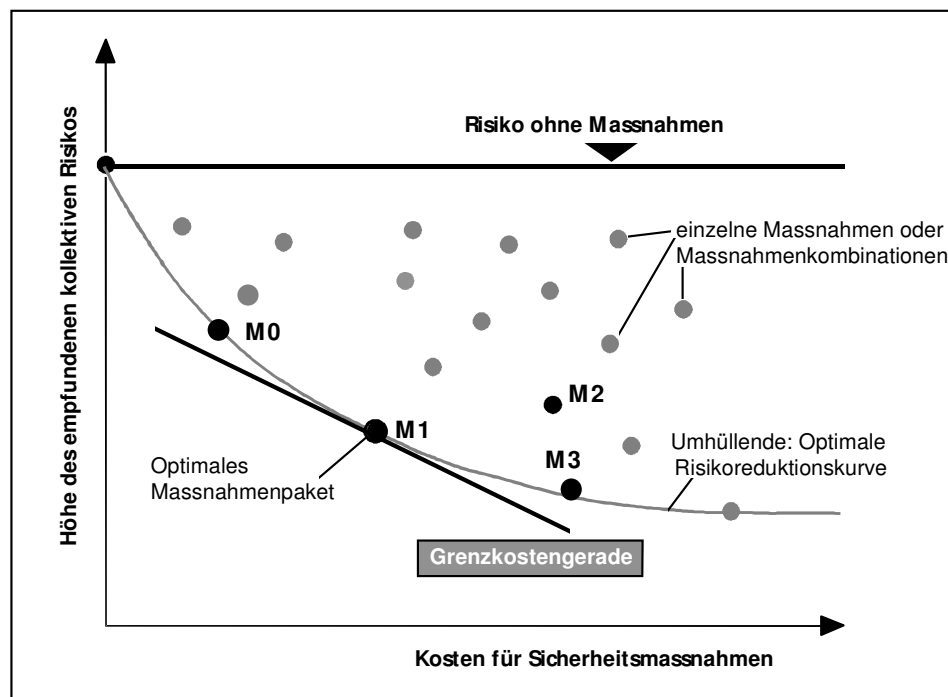


Abbildung 28: Grenzkosten und optimale Maßnahmen

Das System ist demnach ausreichend sicher, wenn es keine Maßnahmen mehr gibt, deren Verhältnis von Kosten und Wirksamkeit kleiner ist als die Grenzkosten. Oder anders ausgedrückt: Wenn es keine verhältnismäßigen Maßnahmen mehr gibt, ist das System ausreichend sicher.

Die Höhe der Grenzkosten legt weitgehend das Sicherheitsniveau fest. Je höher sie sind, desto mehr und aufwendigere Sicherheitsmaßnahmen sind zu ergreifen. Die Festlegung der Grenzkosten ist deshalb eine der zentralen Bewertungsfragen bei kollektiven Risiken. Ein mögliches Vorgehen besteht darin, rückblickend Investitionsentscheide zu analysieren. Jeder Maßnahmenentscheid, auch wenn er nicht unter Anwendung quantitativer Kriterien gefällt wurde, kann im Nachhinein bezüglich Kosten und Wirkung ausgewertet werden. Daraus lässt sich eine Zahlungsbereitschaft ableiten. Hierzu gibt es umfangreiche Studien, die solche „implizite“ Zahlungs-

bereitschaften untersucht und interpretiert haben. Die Grenzkosten umfassen verschiedene Elemente, welche letztlich diese Zahlungsbereitschaft bestimmen:

- Das erste Element beinhaltet die unmittelbaren Schäden, die bei einem Unfall verursacht werden (z. B. Sachschäden, Betriebsausfälle, Haftungsschäden). Sie stellen einen minimalen Schaden dar, den es aus betriebswirtschaftlicher Sicht mit Sicherheitsmassnahmen zu verhindern gilt.
- Das zweite Element beinhaltet die volkswirtschaftlichen Folgekosten, die aus einer Schädigung entstehen. Hier wird davon ausgegangen, dass der Verlust eines Menschenlebens auch mit einem volkswirtschaftlichen Schaden verbunden ist. Der volkswirtschaftliche Ansatz liefert einen Mindestwert, den die Allgemeinheit für Sicherheitsmaßnahmen auszugeben bereit ist, unabhängig von der Art der Gefahr.
- Das dritte Element geht über die erwähnten betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten hinaus und umfasst die zusätzliche Bereitschaft der Allgemeinheit, Schäden durch Sicherheitsanstrengungen zu minimieren. Dabei spielen verschiedene weitere Faktoren eine Rolle, so beispielsweise die Frage, ob es sich um freiwillig oder eher unfreiwillig eingegangene Gefahrensituationen handelt.

Eingangs wurde der Aspekt unterschiedlicher Risikoakzeptanz für verschiedene Risikokategorien erörtert. Die gleichen Überlegungen können nun auch bei der Festlegung der Grenzkosten für das kollektive Risiko herangezogen werden. Für die Beurteilung von Maßnahmen bedeutet dies, dass für die Reduktion „freiwillig“ eingegangener und durch die betroffenen Personen stärker beeinflussbarer Risiken weniger Geldmittel einzusetzen sind, als für „unfreiwillig“ eingegangene Risiken. Umgekehrt kann es sinnvoll sein, große und aufwendige Sicherheitsanstrengungen zu unternehmen, wenn es darum geht, Personen vor „unfreiwilligen“ Risiken, aus denen sie keinen unmittelbaren Nutzen ziehen und die sie nicht beeinflussen können, zu schützen.

Abbildung 29 zeigt Beispiele von Bewertungsansätzen auf Basis von Grenzkosten. Die angegebenen Werte basieren teilweise auf unterschiedlichen Erhebungs- oder Schätzmethoden, was beim direkten Vergleich zu berücksichtigen ist. Trotzdem lässt sich daraus für die einzelnen Risikokategorien die Größenordnung erkennen. Die Bewertungsansätze sind bei der jeweils zutreffenden Risikokategorie eingetragen.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

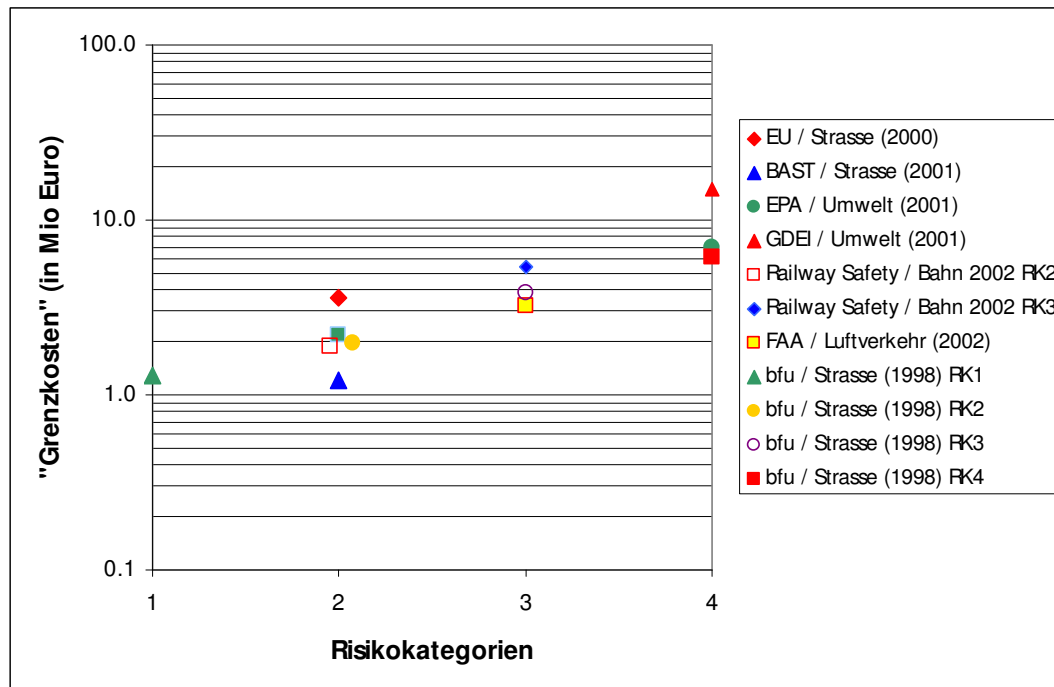


Abbildung 29: Beispiele von Grenzkosten nach Risikokategorie im Verkehrsbereich

Die Ausführungen zur Höhe der Grenzkosten sollen deutlich machen, dass die zugrunde liegende Zahlungsbereitschaft weit über betriebswirtschaftliche Betrachtungen und Optimierungen hinausgeht und letztlich nicht den Wert eines Menschenlebens wiedergibt. Die quantitative Festlegung der Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Risiken ist lediglich ein Hilfsmittel, um Prioritäten zu setzen und insgesamt die verfügbaren Mittel dort zu investieren, wo die Wirkung am größten ist.

Die Stärke des Ansatzes der Kosten-Wirksamkeits-Betrachtung mittels Grenzkosten liegt darin, dass das Grenzkostenkriterium für das kollektive Risiko systemunabhängig ist. Entscheidend ist einzig, dass für gleichartige Risiken (Risikokategorien) gleiche Grenzkosten eingesetzt werden. Damit wird gewährleistet, dass auch über unterschiedliche Systeme hinweg der gleiche Maßstab angewandt wird und damit eine echte Optimierung der Sicherheit erfolgt.

Anhang 9 Richtkosten für Maßnahmen

Für die Bewertung von Maßnahmen aus dem Blickwinkel der Kosten-Wirksamkeit sind die Kostenfolgen für die zu untersuchenden Maßnahmen erforderlich. Im Grundsatz gilt, dass diese Angaben für die Zwecke der Risikoanalyse jeweils spezifisch zu erheben sind, das die Kostenbereiche je nach spezifischer Art und Ausgestaltung sowie der örtlichen Verhältnisse erheblich differieren können. Fehlen entsprechende Grundlagen, können als Hilfestellung zur groben Abschätzung die Richtwerte gemäß der nachfolgenden tabellarischen Übersicht herangezogen werden.

	Tunnel l = 1000 m	Faktor 1 + X für andere Tunnellänge	Gesamt	Einzelpreis	Gesamtpreis
Rohbauarbeiten					
Bauliche Anlagen					
Tunnel offene Bauweise	1'000	1.0	1'000 m	25'000 €/m	25'000'000 €
Tunnel bergmännische Bauweise	1'000	1.0	1'000 m	17'000 €/m	17'000'000 €
Pannenbuchten (bergmännisch)	40	1.0	40 m	23'000 €/m	920'000 €
befahrbare Verbindungsstollen (bergmännisch)	35	1.0	35 m	7'500 €/m	262'500 €
begehbbare Verbindungsstollen (bergmännisch)	35	1.0	35 m	5'000 €/m	175'000 €
Notausgang als Treppenhaus (offene Bauweise)	20	1.0	20 m	15'000 €/m	300'000 €
Fluchttüröffnung in Mittelwand (offene Bauweise)	1	1.0	1 Stck.	1'500 €/Stck.	1'500 €
Brandschutztüren 1,0 x 2,0 m	1	1.0	1 Stck.	1'200 €/Stck.	1'200 €
Brandschutztor 3,0 x 2,5 m	1	1.0	1 Stck.	20'000 €/Stck.	20'000 €
Brandschutztor 4,0 x 3,5 m	1	1.0	1 Stck.	25'000 €/Stck.	25'000 €
Abluftzentrale/ Luftaustauschzentrale	1	1.0	1 Stck.	1'500'000 €/Stck.	1'500'000 €
Lüfterzwischenendecke	1'000	1.0	1'000 m	1'000 €/m	1'000'000 €
Technische Ausstattung					
Komplettausstattung der Tunneltechnik					
Tunnel im Gegenverkehr	1'000	1.0	1'000 m	3'500 €/m	3'500'000 €
Tunnel im Richtungsverkehr (je Röhre)	1'000	1.0	1'000 m	2'500 €/m	2'500'000 €
Technische Ausstattung					
Betriebskosten der Tunneltechnik pro Jahr					
Tunnel im Gegenverkehr	1'000	1.0	1'000 m	150 €/m	150'000 €
Tunnel im Richtungsverkehr (je Röhre)	1'000	1.0	1'000 m	100 €/m	100'000 €
Tunnellüftung für Gegenverkehrstunnel					
Axiallüfter (für Rauchabsaugung)	2	1.0	2 Stck.	500'000 €/Stck.	1'000'000 €
Rauchabzugsklappen (alle 70 m)	14	1.0	14 Stck.	22'000 €/Stck.	308'000 €
Strahl Lüfter (für Normalbetrieb)	6	1.0	6 Stck.	18'000 €/Stck.	108'000 €
Co-Meßgeräte	1	0.5	1 Stck.	6'000 €/Stck.	6'000 €
Sichttrübungsmeßgeräte	3	1.0	3 Stck.	11'000 €/Stck.	33'000 €
Längsströmungsmeßgeräte	2	0.5	2 Stck.	9'000 €/Stck.	18'000 €

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

	Tunnel l = 1000 m	Faktor 1 + X für andere Tunnellänge	Gesamt	Einzelpreis	Gesamtpreis
Tunnellüftung für Richtungsverkehrstunnel					
Axiallüfter (für Luftaustausch ab 3000 m)	2	0.5	2 Stck.	800'000 €/Stck.	1'600'000 €
Strahllüfter (für Normalbetrieb und Brandbetrieb)	14	1.0	14 Stck.	18'000 €/Stck.	252'000 €
Co-Meßgeräte	1	0.5	1 Stck.	6'000 €/Stck.	6'000 €
Sichttrübungsmeßgeräte	3	1.0	3 Stck.	11'000 €/Stck.	33'000 €
Längsströmungsmeßgeräte	2	0.5	2 Stck.	9'000 €/Stck.	18'000 €
					1'909'000 €
Fluchtstollenlüftung					
Lüftung Fluchtstollen (Schleuse mit Axiallüfter)	1	1.0	1 Stck.	80'000 €/Stck.	80'000 €
Lüftung Fluchttreppenhaus (Überdruckbelüftung)	1	1.0	1 Stck.	55'000 €/Stck.	55'000 €
Kommunikationseinrichtungen					
begehbare Notrufzellen	6	1.0	6 Stck.	15'000 €/Stck.	90'000 €
Videokameras mit Detektion	13	1.0	13 Stck.	10'000 €/Stck.	130'000 €
Tunnelfunk	1'000	1.0	1'000 m	210 €/m	210'000 €
Lautsprecher	30	1.0	30 Stck.	1'700 €/Stck.	51'000 €
Brandmeldeeinrichtungen					
automatische Brandmeldeanlage	1'000	1.0	1'000 m	130 €/m	130'000 €
Löscheinrichtungen					
Löschwasserleitung	1'000	1.0	1'000 m	100 €/m	100'000 €
Hydranten alle 150 m	7	1.0	7 Stck.	5'000 €/Stck.	35'000 €
Löschwasserbehälter am Portal (für l < 400 m)	2	1.0	2 Stck.	70'000 €/Stck.	140'000 €
Druckerhöhungsanlage	1	0.3	1 Stck.	50'000 €/Stck.	50'000 €
Auffangbecken	1	1.0	1 Stck.	85'000 €/Stck.	85'000 €
Hebeanlage (bei Tiefpunkt im Tunnel)	1	0.3	1 Stck.	75'000 €/Stck.	75'000 €
Druckleitung für Hebeanlage	500	1.0	500 m	80 €/m	40'000 €
Verkehrsbeeinflussungseinrichtungen					
Mindestausstattung (für l < 300 m)	300	1.0	300 m	200 €/m	60'000 €
Grundausrüstung	1'000	1.0	1'000 m	300 €/m	300'000 €
erweiterte Ausstattung	1'000	1.0	1'000 m	900 €/m	900'000 €
					1'260'000 €
Informationseinrichtungen					
Brandnotbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung	40	1.0	40 Stck.	1'400 €/Stck.	56'000 €
Aktive Leiteinrichtungen (auf beiden Fahrbahnseiten)	1'000	0.8	1'000 m	50 €/m	50'000 €

Anmerkung: Für Tunnel über 1000m ist wie folgt zu rechnen:

$$I_{\text{ges}} = I_1 + (I - I_1) \cdot \text{Faktor}$$

mit $I_1 = 1000\text{m}$, $I =$ aktuelle Länge, $I_{\text{ges}} =$ Länge zur Bestimmung der Kosten

Beispiel: aktive Leiteinrichtungen für Tunnel mit $I = 2700\text{m}$

$$I_{\text{ges}} = 1000 + (2700 - 1000) \cdot 0,8 = 2360\text{m}$$

Tabelle 11: Richtwerte für Kosten baulicher, betrieblicher und technischer Maßnahmen

Anhang 10 Fallbeispiele

A 10.1 Einleitung

Die Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln wurde im Rahmen der Entwicklung für fünf Tunnel exemplarisch angewendet. Ziel der Anwendung war die Überprüfung der Anwendbarkeit der Methodik.

Für die Zwecke der Anwendung wurden die für die Anwendung erforderlichen Grundlegendaten in Anlehnung an existierende bzw. geplante Tunnel in Deutschland herangezogen, die Daten jedoch teilweise geändert oder ergänzt. Zudem wurden aufgrund des erforderlichen Aufwandes und der genannten Zielsetzung für das Szenario Brand nicht sämtliche Schadenausmaßermittlungen mittels Modellen ermittelt, sondern punktuell auf Basis von Analogieüberlegungen die entsprechenden Werte abgeschätzt. Die berechneten Ergebnisse für die 5 Fallbeispiele erheben deshalb nicht den Anspruch, die reale Risikosituation für zur als Grundlage herangezogenen Tunnel abzubilden. Die Anwendung der Fallbeispiele fokussiert auf den Aspekt der Analyse der Risiken.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Fallbeispiele für die Tunnel A bis E zusammengefasst.

A 10.2 Tunnel A

Die Auswertungen zu Tunnel A finden sich in Kapitel 5 des Hauptberichtes.

A 10.3 Tunnel B

Tunneldaten

Tunnel B ist ein Gegenverkehrverkehrstunnel. Die für die analytische Sicherheitsbewertung maßgeblichen Grundlagendaten sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Neben den genannten Eingangsgrößen sind insbesondere noch Grundlageninformationen zur Tunnellüftung (Lüftungskonzept) in die Analyse eingegangen.

Tunnelname	B
Tunnelparameter	
Verkehrsart	GV
Anz. Fahrstreifen pro Richtung	1
Fahrstreifenbreite	3.50 m
Seitenstreifen	-
Lichte Breite	9.5 m / 11.1 m *
Lichte Höhe	5.0 m / 7.1 m **
Länge	1'080 m
Min. Längsneigung	-1.0 %
Max. Längsneigung	-1.3 %
V _{zul}	
Lüftungssystem	Längslüftung mit Rauchabzugkanal
Notausgänge / Fluchtwege	Notausgänge alle 260-270 m
Zu-/Abfahrten vorhanden	nein
Verkehrsdaten	
DTV	13'000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	6.0 %
Annahme Stautunden	200 h / Jahr

Tabelle 12: Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel B

Ergebnisse Szenariotyp Kollision

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Kollisionshäufigkeit von 3.5 Unfällen für den Tunnel ermittelt werden.
- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Kollisionen liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.04 Todesopfern pro Jahr. Somit ist statistisch etwa alle 25 Jahre mit einer Kollision mit Todesfolge im Tunnel B zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 320'000.- pro Jahr.

Ergebnisse Szenariotyp Brand

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Brandhäufigkeit von 0.02 Bränden für den Tunnel ermittelt werden.
- Die Abschätzungen des Schadenausmaßes wurden sowohl Simulationen mit einem CFD-Computerprogramm (Fire Dynamic Simulator, FDS) als auch mit einem eindimensionalen Modell (Computer-Modell "RAST") vorgenommen. Nachfolgend sind exemplarische grafische Darstellungen der ermittelten Simulationsergebnisse abgebildet.

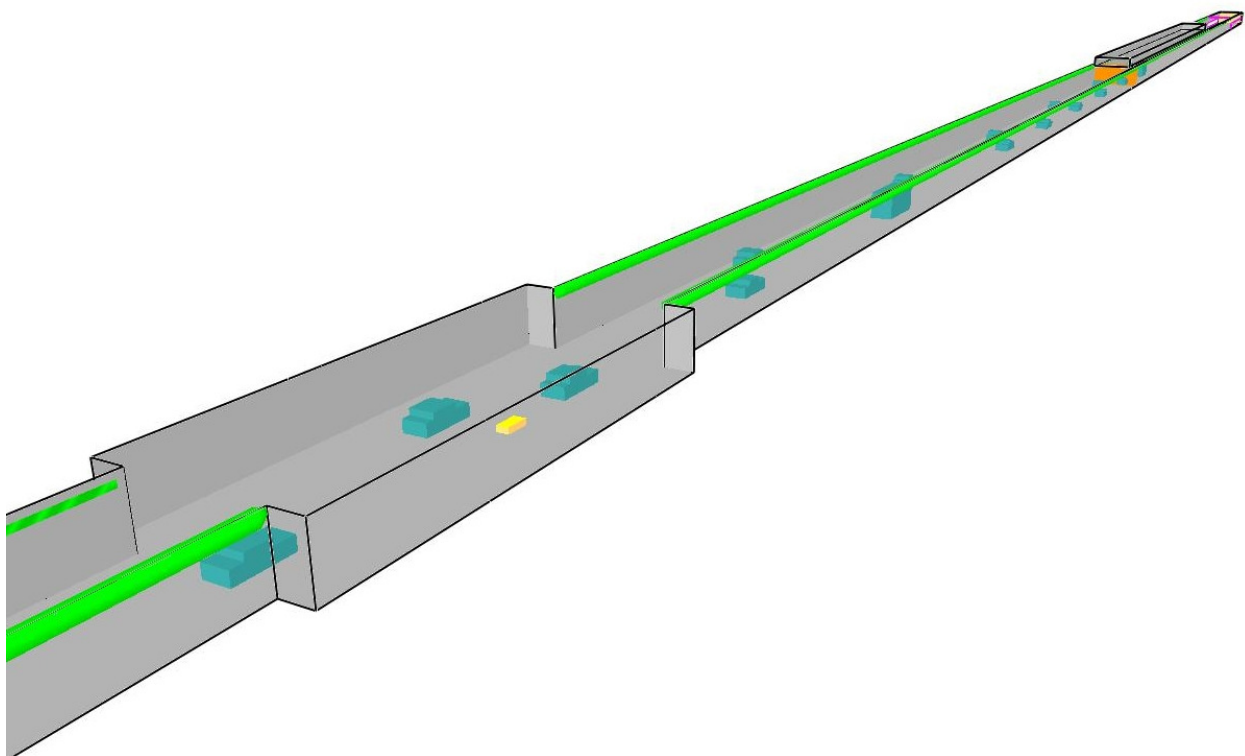


Abbildung 30: Modell zur Brandsimulation mittels FDS für den Tunnel B

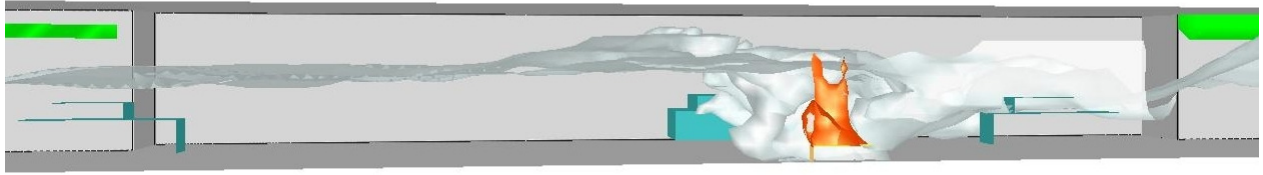


Abbildung 31. Darstellung der simulierten Rauchfront bei einem 5 MW-Brand (mit Lüftung)

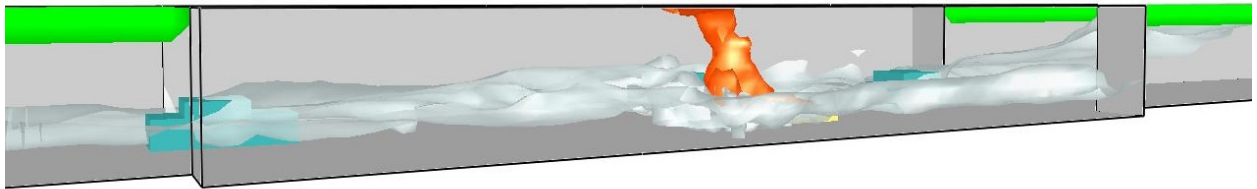


Abbildung 32: Darstellung der simulierten Rauchfront bei einem 30 MW-Brand (mit Lüftung)

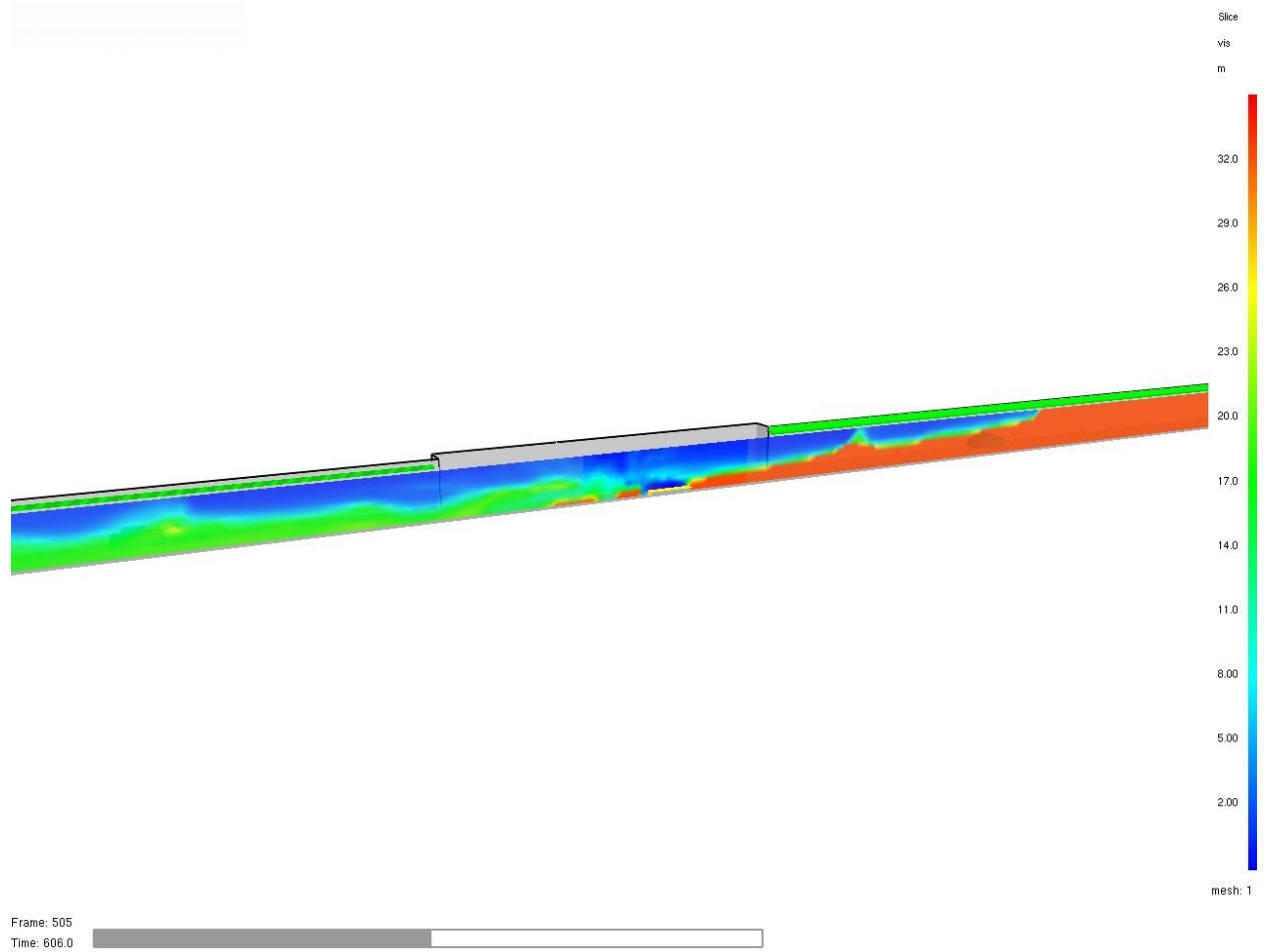


Abbildung 33: Darstellung der Sichtweiten bei einem 30 MW-Brand (mit Lüftung)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

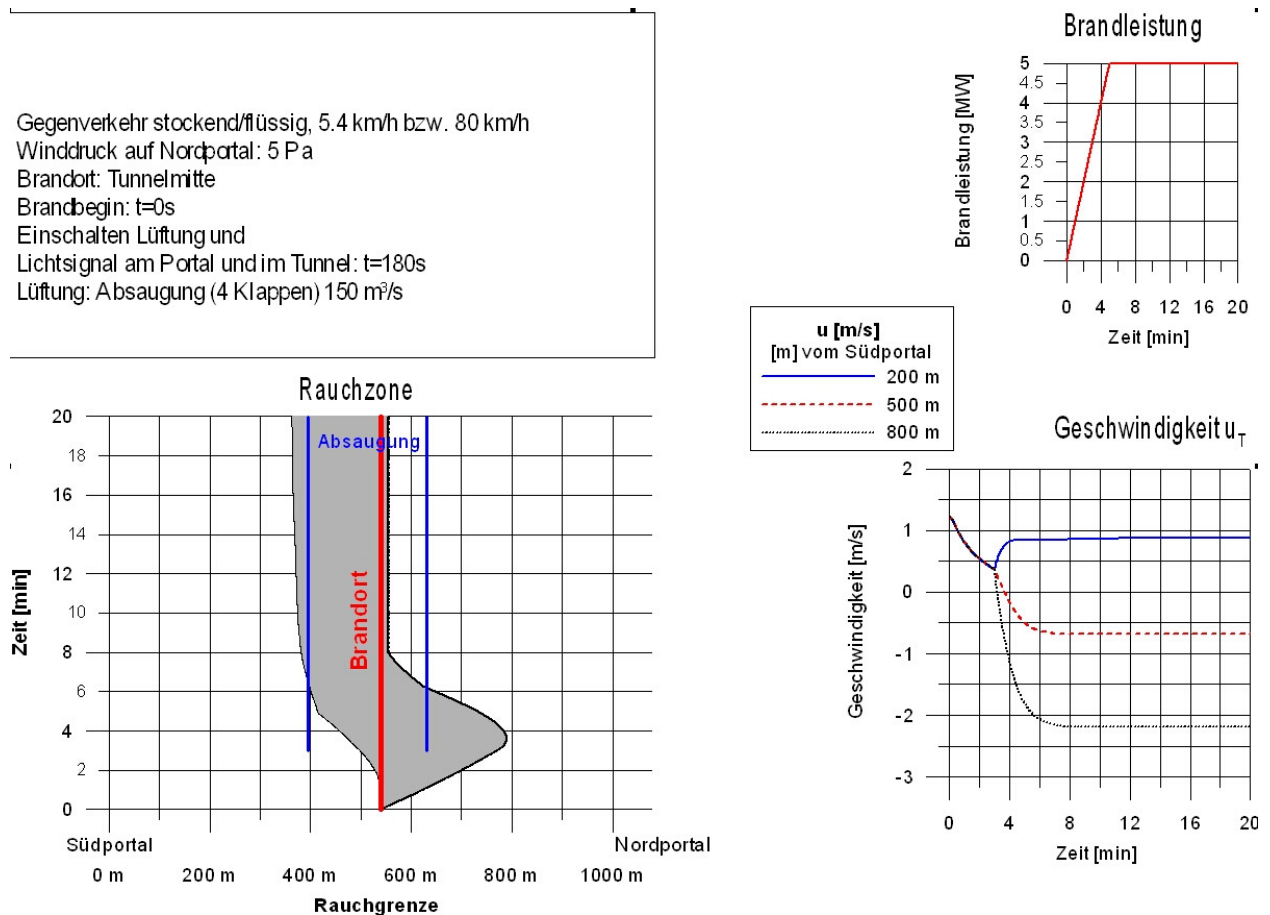


Abbildung 34: Ergebnisse Rauchgasausbreitung eines 5 MW-Brandes mittels "RAST"

- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Brandereignisse liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.001 Todesopfern pro Jahr. Somit wäre statistisch etwa alle 1'000 Jahre mit einem Brandereignis mit Todesfolge im Tunnel B zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 20'000.- pro Jahr.

Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (Schadenindikator Todesopfer)

Nachfolgend sind die ermittelten normierten Summenkurven (Bezugslänge 1 km) für die Szenariotypen Kollision und Brand sowie die resultierende Gesamtsummenkurve im Häufigkeits-Sachendausmaß-Diagramm für den Schadenindikator Todesopfer dargestellt.

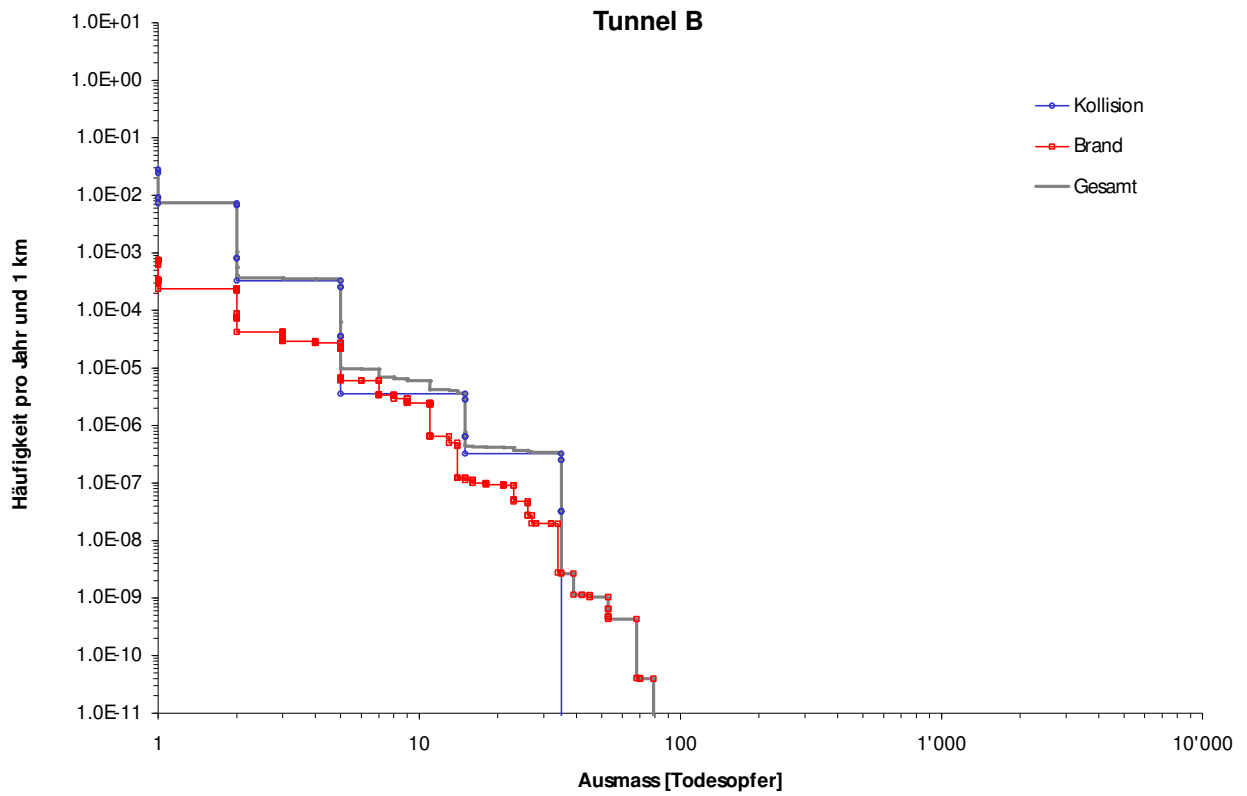


Abbildung 35: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel B

A 10.4 Tunnel C

Tunneldaten

Tunnel C ist ein Richtungsverkehrstunnel mit zwei Tunnelröhren. Die für die analytische Sicherheitsbewertung maßgeblichen Grundlagendaten sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Neben den genannten Eingangsgrößen sind insbesondere noch Grundlageninformationen zur Tunnellüftung (Lüftungskonzept) in die Analyse eingegangen.

Tunnelname	C	
Tunnelparameter	Nordröhre	Südröhre
Verkehrsart	RV, aufsteigend	RV, absteigend
Anz. Fahrstreifen pro Richtung	3	3
Fahrstreifenbreite	3.40 m	3.40 m
Seitenstreifen	vorhanden	vorhanden
Lichte Breite	13.5 m	13.5 m
Lichte Höhe	4.7 m	4.7 m
Länge	2'530 m	2'531 m
Min. Längsneigung	0.0 %	0.0 %
Max. Längsneigung	0.9 %	0.9 %
Vzul	100 km/h	100 km/h
Lüftungssystem	Halbquerlüftung	
Notausgänge / Fluchtwege	Notausgänge alle 310-330 m, 7 Querverbindungen	
Zu-/Abfahrten vorhanden	ja	
Verkehrsdaten		
DTV	90'000 Kfz/d	
Schwerverkehrsanteil	17.0 %	
Annahme Stautunden	350 h / Jahr	

Tabelle 13: Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel C

Ergebnisse Szenariotyp Kollision

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Kollisionshäufigkeit von 43 Unfällen für den Tunnel ermittelt werden.
- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Kollisionen liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.5 Todesopfern pro Jahr. Somit ist statistisch etwa alle 2 Jahre mit einer Kollision mit Todesfolge im Tunnel C zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 4'450'000.- pro Jahr.

Ergebnisse Szenariotyp Brand

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Brandhäufigkeit von 0.33 Bränden für den Tunnel C ermittelt werden.
- Die Abschätzungen des Schadenausmaßes wurden mit einem eindimensionalen Modell (Computer-Modell "RAST") vorgenommen. Nachfolgend sind zwei exemplarische grafische Darstellungen der auf Basis der ermittelten Simulationsergebnisse abgeleiteten Diagramme zur Berücksichtigung der Selbstrettungsmöglichkeiten bzw. zur Bestimmung der Modellwerte des Schadenausmaßes in Todesopfern abgebildet.

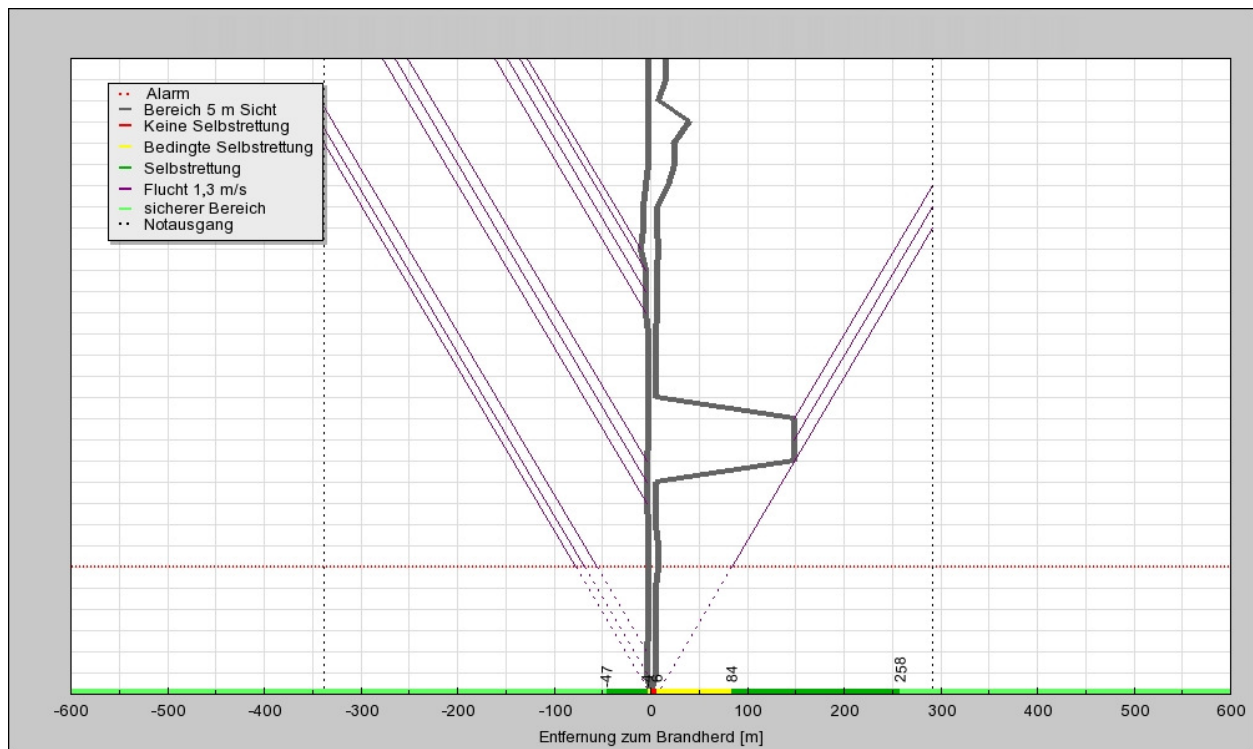


Abbildung 36: Schadenausmaßermittlung für einen 30 MW-Brand, Situation fließender Verkehr, mit Lüftung

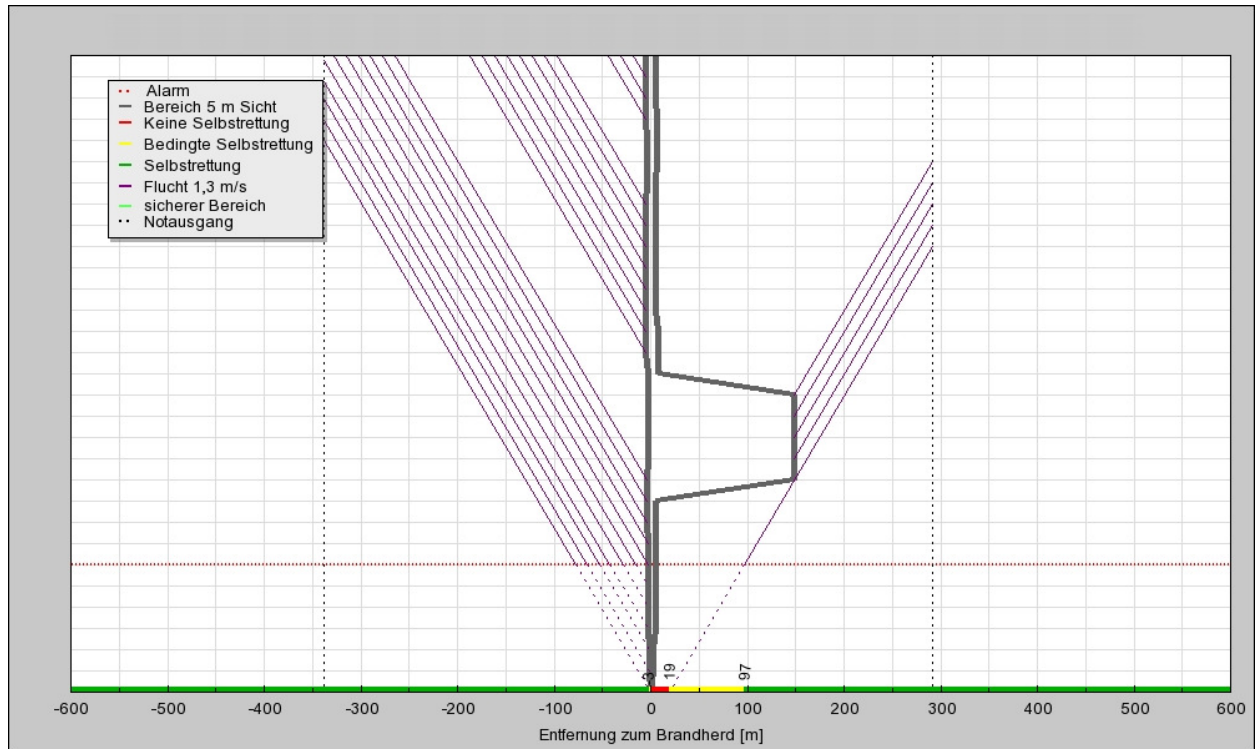


Abbildung 37: Schadenausmaßermittlung für einen 30 MW-Brand, Situation fließender Verkehr, ohne Lüftung

- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Brandereignisse liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.02 Todesopfern pro Jahr. Somit wäre statistisch etwa alle 50 Jahre mit einem Brandereignis mit Todesfolge im Tunnel C zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 280'000.- pro Jahr.

Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (Schadenindikator Todesopfer)

Nachfolgend sind die ermittelten normierten Summenkurven (Bezugslänge 1 km) für die Szenariotypen Kollision und Brand sowie die resultierende Gesamtsummenkurve im Häufigkeits-Sachendausmaß-Diagramm für den Schadenindikator Todesopfer dargestellt.

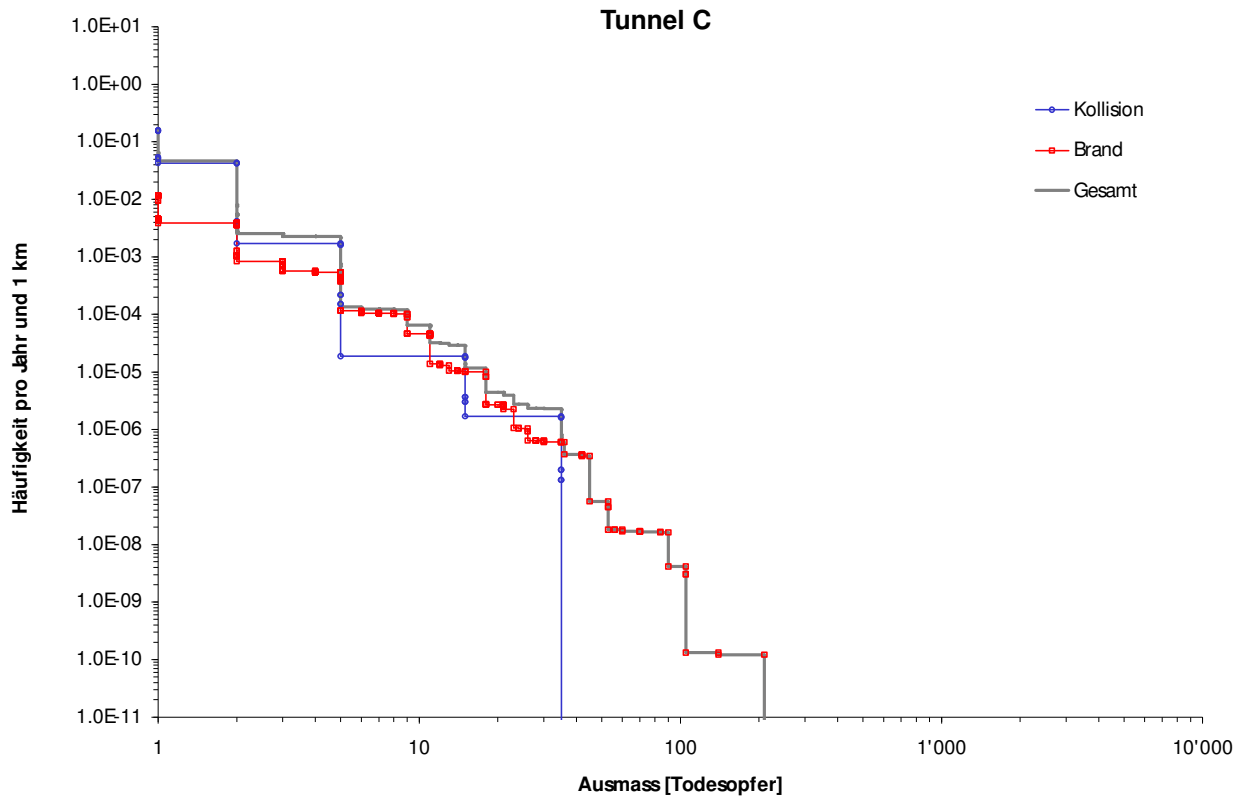


Abbildung 38: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel C

A 10.5 Tunnel D

Tunneldaten

Tunnel D ist ein Gegenverkehrstunnel. Die für die analytische Sicherheitsbewertung maßgeblichen Grundlagendaten sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Neben den genannten Eingangsgrößen sind insbesondere noch Grundlageninformationen zur Tunnellüftung (Lüftungskonzept) in die Analyse eingegangen.

Tunnelname	D
Tunnelparameter	
Verkehrsart	GV
Anz. Fahrstreifen pro Richtung	1
Fahrstreifenbreite	4.00 m
Seitenstreifen	-
Lichte Breite	10.0 m
Lichte Höhe	4.9 m
Länge	2'715 m
Min. Längsneigung	0.0 %
Max. Längsneigung	1.8 %
Vzul	70 km/h
Lüftungssystem	Längslüftung mit Rauchabzugkanal
Notausgänge / Fluchtwege	Notausgänge alle 300 m
Zu-/Abfahrten vorhanden	nein
Verkehrsdaten	
DTV	15'200 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	4.5 %
Annahme Stautunden	200 h / Jahr

Tabelle 14: Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel D

Ergebnisse Szenariotyp Kollision

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Kollisionshäufigkeit von 10 Unfällen für den Tunnel ermittelt werden.
- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Kollisionen liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.13 Todesopfern pro Jahr. Somit ist statistisch etwa alle 8 Jahre mit einer Kollision mit Todesfolge im Tunnel D zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 1'000'000.- pro Jahr.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Ergebnisse Szenariotyp Brand

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Brandhäufigkeit von 0.07 Bränden für den Tunnel ermittelt werden.
- Die Abschätzungen des Schadenausmaßes wurden mit einem eindimensionalen Modell (Computer-Modell "RAST") vorgenommen. Nachfolgend sind zwei exemplarische grafische Darstellungen der ermittelten Simulationsergebnisse abgebildet.

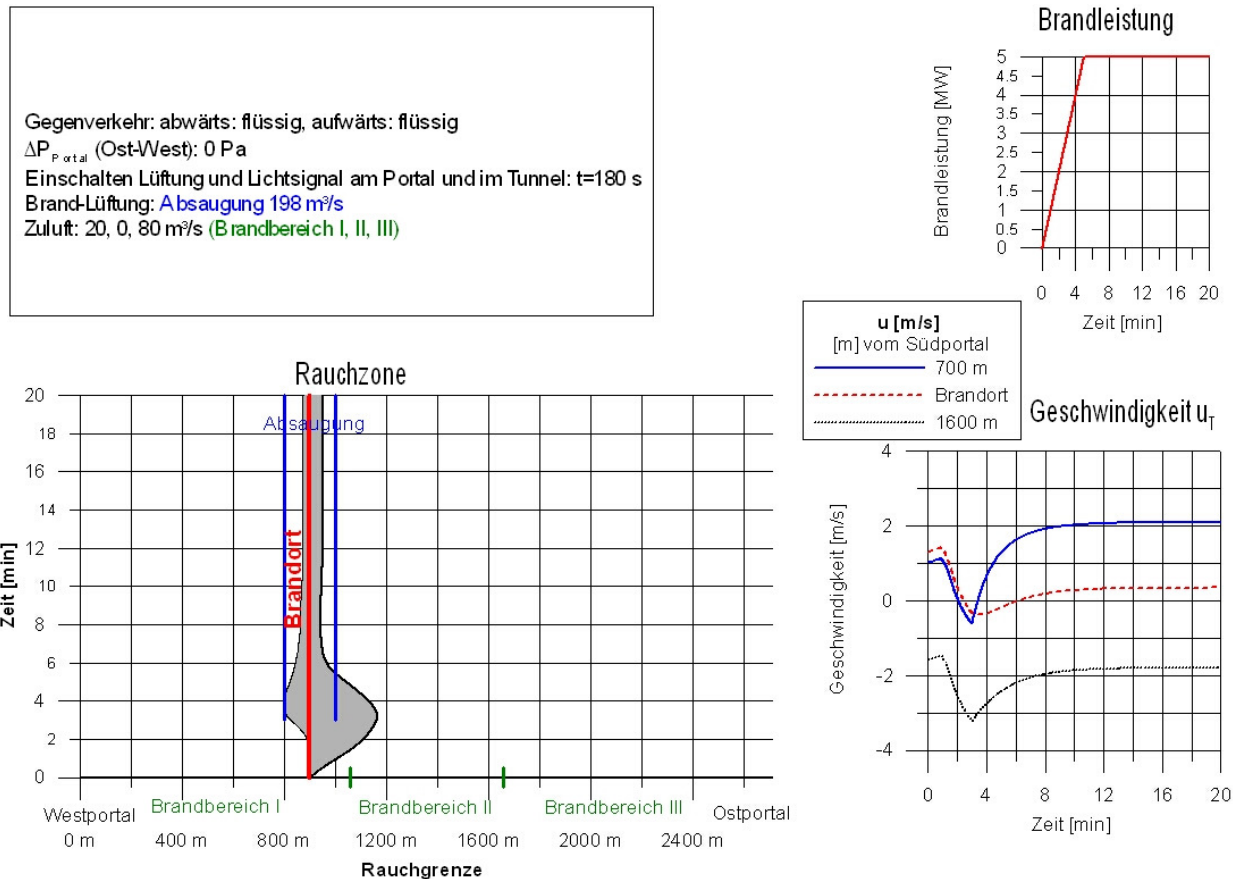


Abbildung 39: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 5 MW-Brand mittels "RAST" (mit Lüftung)

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

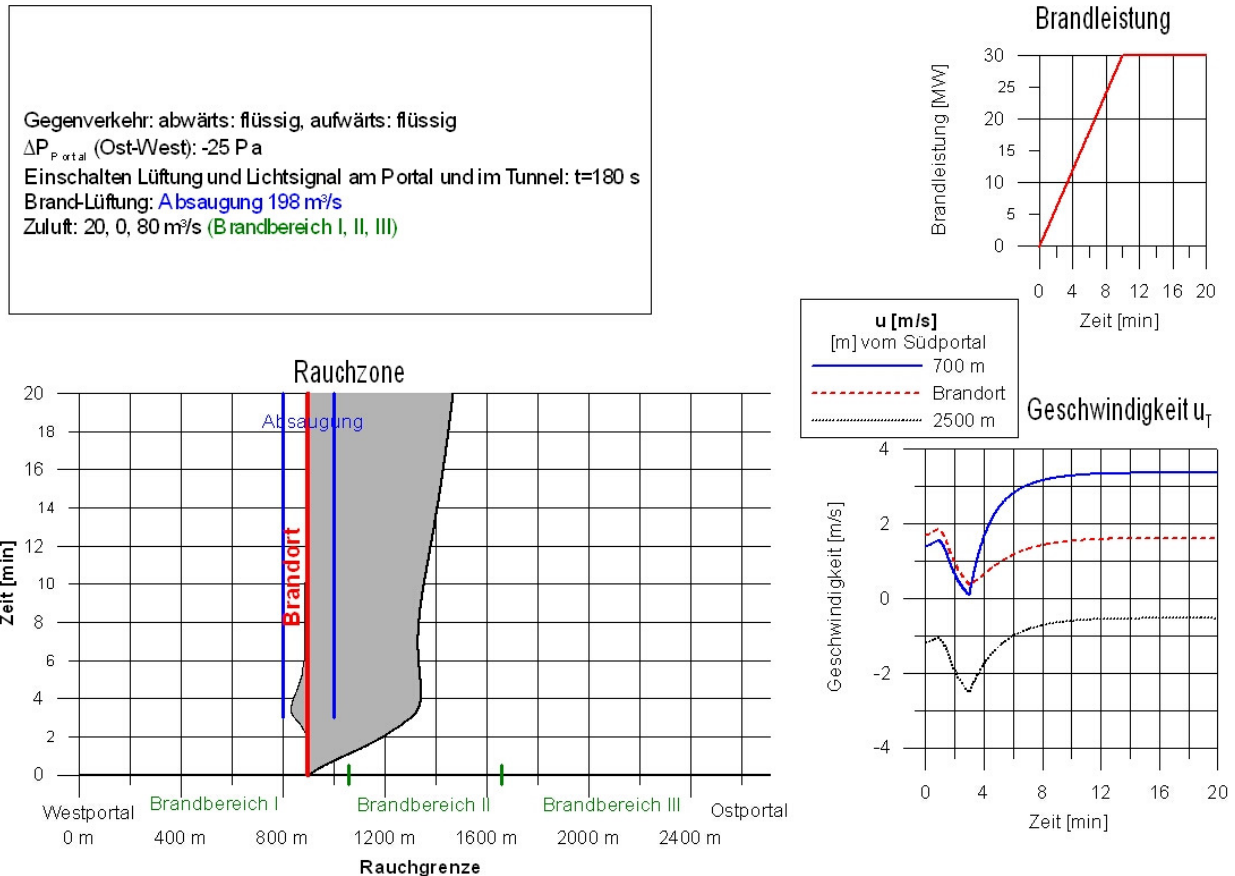


Abbildung 40: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 30 MW-Brand mittels "RAST" (mit Lüftung)

- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Brandereignisse liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.003 Todesopfern pro Jahr. Somit wäre statistisch etwa alle 300 Jahre mit einem Brandereignis mit Todesfolge im Tunnel D zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 50'000.- pro Jahr.

Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (Schadenindikator Todesopfer)

Nachfolgend sind die ermittelten normierten Summenkurven (Bezugslänge 1 km) für die Szenariotypen Kollision und Brand sowie die resultierende Gesamtsummenkurve im Häufigkeits-Sachendausmaß-Diagramm für den Schadenindikator Todesopfer dargestellt.

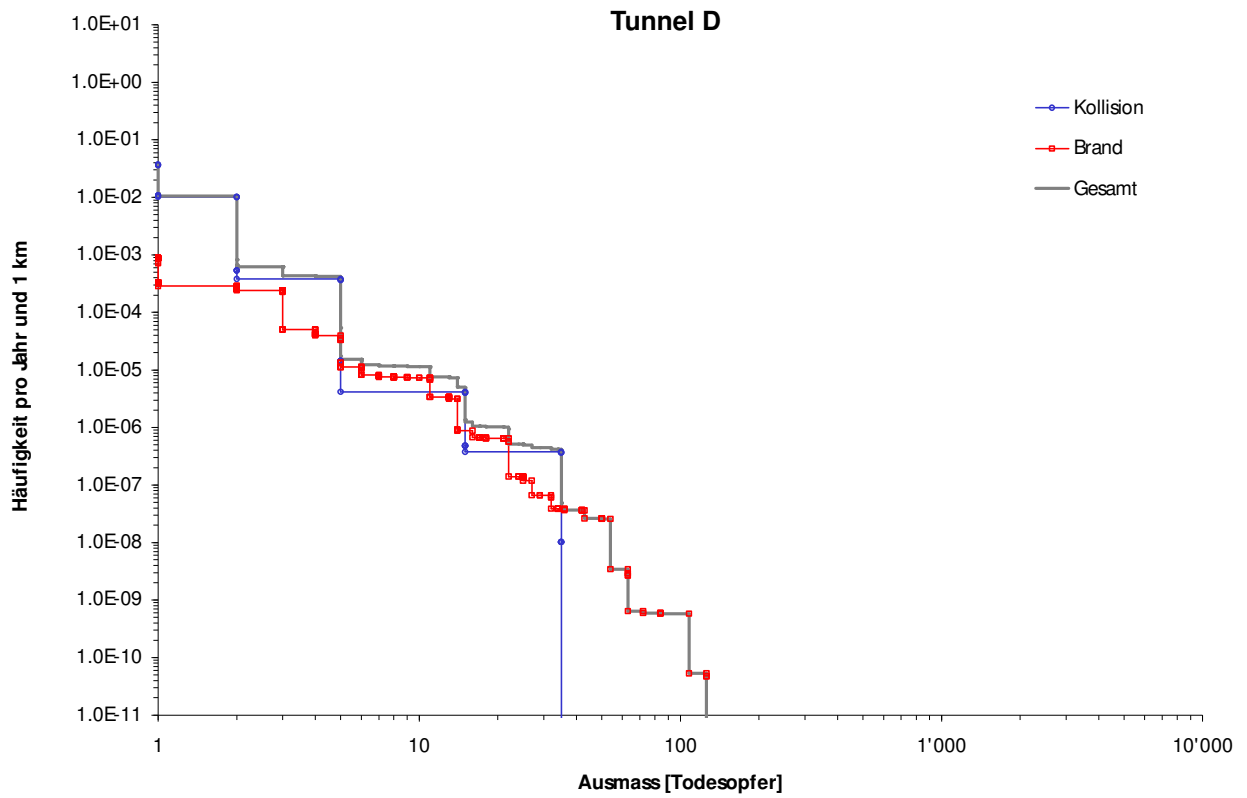


Abbildung 41: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel D

A 10.6 Tunnel E

Tunneldaten

Tunnel E ist ein Richtungsverkehrstunnel mit zwei Tunnelröhren. Die für die analytische Sicherheitsbewertung maßgeblichen Grundlagendaten sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Neben den genannten Eingangsgrößen sind insbesondere noch Grundlageninformationen zur Tunnellüftung (Lüftungskonzept) in die Analyse eingegangen.

Tunnelname	E	
Tunnelparameter	Nord-West-Röhre	Süd-Ost-Röhre
Verkehrsart	RV, aufsteigend	RV, absteigend
Anz. Fahrstreifen pro Richtung	2	3
Fahrstreifenbreite	3.75 m	3.75 m
Seitenstreifen	-	-
Lichte Breite	9.5 m	9.5 m
Lichte Höhe	4.5 m	4.5 m
Länge	7'878 m	7'916 m
Min. Längsneigung	2.0 %	2.0 %
Max. Längsneigung	2.0 %	2.0 %
Vzul	80 km/h	80 km/h
Lüftungssystem	Längslüftung mit 3 Lüftungsabschnitten	
Notausgänge / Fluchtwege		
Zu-/Abfahrten vorhanden	nein	
Verkehrsdaten		
DTV	14'400 Kfz/d	
Schwerverkehrsanteil	11.6 %	
Annahme Stautunden	200 h / Jahr	

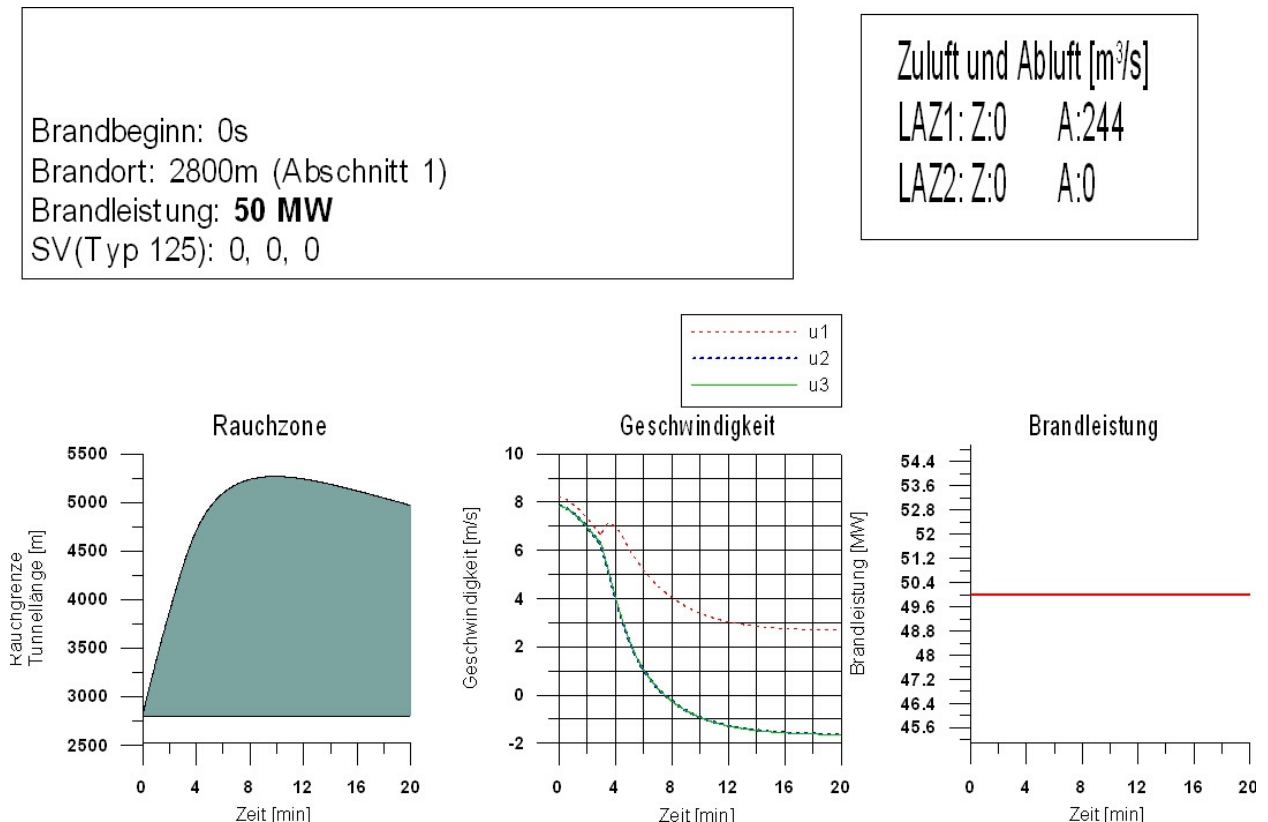
Tabelle 15: Eingangsdaten für Fallbeispiel Tunnel E

Ergebnisse Szenariotyp Kollision

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Kollisionshäufigkeit von 9.5 Unfällen für den Tunnel ermittelt werden.
- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Kollisionen liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.1 Todesopfern pro Jahr. Somit ist statistisch etwa alle 10 Jahre mit einer Kollision mit Todesfolge im Tunnel C zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 1'000'000.- pro Jahr.

Bewertung der Sicherheit von StraßentunnelnErgebnisse Szenariotyp Brand

- Anhand der Methodik kann eine statistische jährliche Brandhäufigkeit von 0.13 Bränden für den Tunnel C ermittelt werden.
- Die Abschätzungen des Schadenausmaßes wurden mit einem eindimensionalen Modell vorgenommen. Nachfolgend ist exemplarisch eine grafische Darstellung dazu abgebildet.

**Abbildung 42: Ergebnisse Rauchgasausbreitung 50 MW-Brand (ohne Lüftung)**

- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Brandereignisse liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.01 Todesopfern pro Jahr. Somit wäre statistisch etwa alle 100 Jahre mit einem Brandereignis mit Todesfolge im Tunnel E zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 220'000.- pro Jahr.

Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (Schadenindikator Todesopfer)

Nachfolgend sind die ermittelten normierten Summenkurven (Bezugslänge 1 km) für die Szenariotypen Kollision und Brand sowie die resultierende Gesamtsummenkurve im Häufigkeits-Sachendausmaß-Diagramm für den Schadenindikator Todesopfer dargestellt.

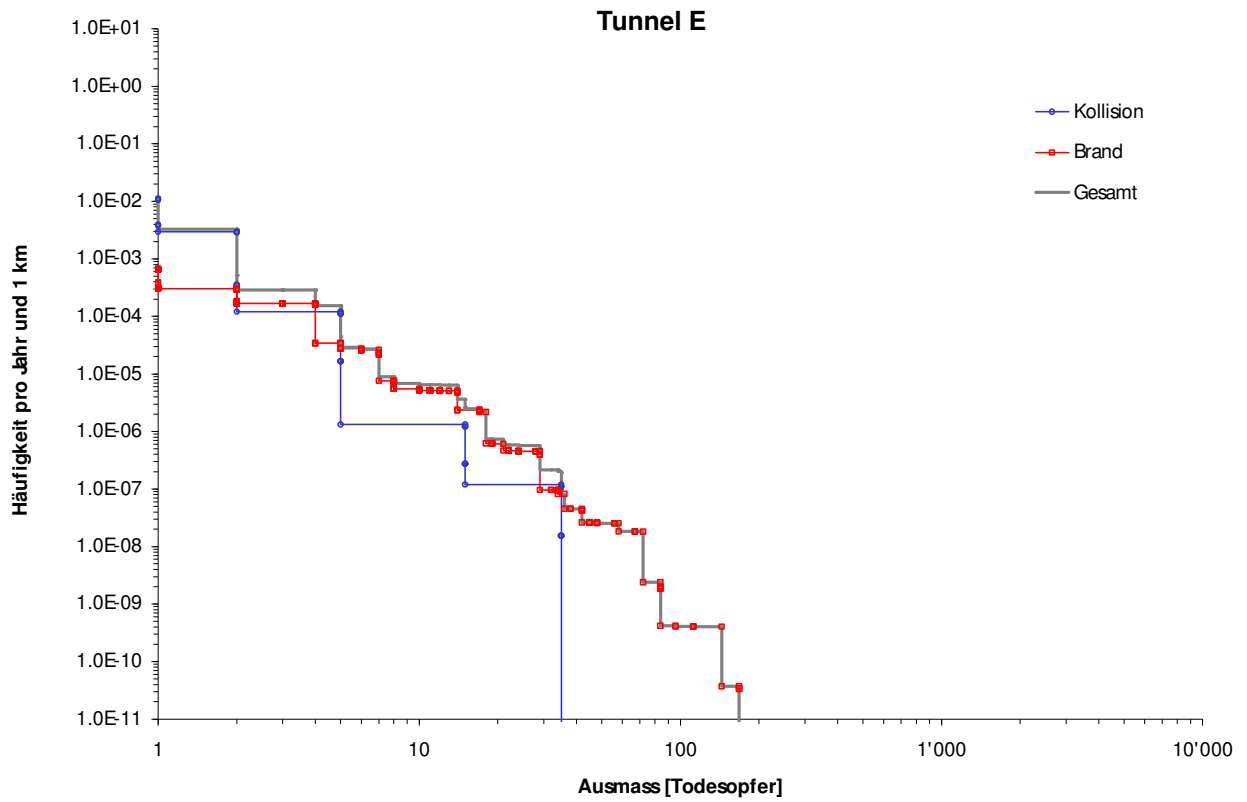


Abbildung 43: Häufigkeits-Schadenausmaß-Diagramm Tunnel E