

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 66

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

von

Christoph Zulauf
Peter Locher

Ernst Basler + Partner, Zürich

Bernhard Steinauer
Georg Mayer
Uwe Zimmermann

Institut für Straßenwesen Aachen, RWTH Aachen

Wolfgang Baltzer
Werner Riepe

BUNG-AG, beratende Ingenieure, Heidelberg

Peter Kündig

Kündig Ingenieurbüro, Zürich

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 66

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB:
Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Projektbetreuung
Christof Sistenich

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-909-9

Bergisch Gladbach, Mai 2009

Kurzfassung – Abstract

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Die Regelwerke RABT 2006 bzw. 2004/54/EG legen heute die einheitlichen Mindestanforderungen an die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln in Deutschland fest. Wird von diesen Anforderungen in begründeten Fällen abgewichen oder weist ein Tunnel eine besondere Charakteristik auf, so ist durch eine Risikoanalyse aufzuzeigen, dass durch den Einsatz alternativer Maßnahmen ein vergleichbar hohes Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann.

Um die in den Richtlinien genannte Forderung zu konkretisieren und eine praktische Umsetzung zu ermöglichen, wurde eine quantitative Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln entwickelt. Als Grundlage für die Herleitung der erforderlichen statistischen Eingangsgrößen wurden im Rahmen einer Unfallanalyse für 80 Tunnel rund 1'000 Unfallprotokolle spezifisch ausgewertet. Mit der Methodik können die Vorgaben für eine einheitliche und vergleichbare Durchführung von Sicherheitsbeurteilungen geschaffen werden. Bei der Entwicklung der Methodik wurden die Erfahrungen aus anderen, vergleichbaren Sicherheitsbereichen herangezogen und die entsprechenden Ansätze auf ihre Tauglichkeit hin für eine Anwendung im vorliegenden Kontext geprüft. Daneben wurden die aktuellen Entwicklungen und methodischen Ansätze zur Umsetzung der Forderungen gemäß Artikel 13 der Richtlinie 2004/54/EG im Ausland analysiert und die entsprechenden Erkenntnisse so weit sinnvoll in die Entwicklung der Methodik einbezogen.

Die Methodik basiert in ihren Grundsätzen und dem gewählten Vorgehen auf einem risikoorientierten Ansatz, der in verschiedenen Ländern zu unterschiedlichsten Sicherheitsfragen bereits erfolgreich angewandt wird. Bei der Erarbeitung der Methodik wurde darauf geachtet, dass der gewählte Ansatz neben der Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen im Hinblick auf die künftige Anwendung auch einen engen praxisorientierten Bezug aufweist. Die Methodik gibt aber bewusst nicht zu allen Aspekten „rezeptartige“ Vorgaben vor, sondern definiert einen Rahmen, innerhalb dessen die konkrete Anwendung durchzuführen ist.

Für das Regelwerk wurden Empfehlungen zum weiteren Vorgehen abgegeben sowie weiterer For-

schungsbedarf aufgezeigt, welcher insbesondere die Aspekte der Risikobewertungskriterien sowie der Datengrundlagen betrifft.

Um die Suche innerhalb des Berichtes zu erleichtern, wird dieser zusätzlich noch einmal auf der beiliegenden CD angeboten. Sie enthält darüber hinaus die Anlagen und den Bericht in englischer Sprache.

Assessing the safety of road tunnels

The minimum requirements on the equipment and the operation of road tunnels are specified in the guidelines RABT 2006 and 2004/54/EC. In case of deviations from these requirements, or where a tunnel has special characteristics, a risk analysis shall be carried out to clarify whether additional safety measures and/or supplementary equipment is necessary to ensure a comparable high level of tunnel safety.

In order to specify the requirements according to RABT 2006 and 2004/54/EC and to promote a practical use of risk analyses, a quantitative methodology for the assessment of road tunnel safety was developed. For that purpose approximately 1'000 reports of accidents in 80 tunnels have been analysed statistically. The methodology allows a standardized and comparable implementation of safety assessments. For the development of the methodology, experiences from other safety areas were considered and the suitability of different methodical approaches were analysed. Furthermore the current developments and methodical approaches in the context of the implementation of article 13 of 2004/54/EC in different countries were analyzed and relevant findings were included in the development of the methodology.

The principles of the methodology rely on a risk-based approach, which is applied successfully in different countries and for different safety areas. The methodology is based on scientific basic principles with respect to a practice oriented implementation and defines a framework within the

assessment of the safety of a road tunnel should be done.

For the further improvements of the existing guidelines recommendations were proposed, as well as the need for further research, especially concerning the aspects of risk evaluation criteria and the further collection of data.

To facilitate searching within the report for the user, it is provided with its appendices once more on the attached CD, which contains in addition an English version of the report.

Inhalt

Vorwort	11	4.5	Risikobewertung und Maßnahmenplanung	37
1 Einleitung und Ausgangslage	11	4.5.1	Bewertung mittels Summenkurven im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm	37
2 Zielsetzung und Abgrenzung	11	4.5.2	Bewertung von Maßnahmen mittels Kosten-Wirksamkeit	38
2.1 Zielsetzung des Forschungsprojektes	11	5 Fallbeispiel		39
2.2 Abgrenzung	12	5.1	Angaben zum Tunnel	39
3 Vorgehen zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln	12	5.2	Szenariotyp Kollision (ohne Brand) ...	39
3.1 Die risikoorientierte Sicherheitsbewertung	12	5.3	Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“	42
3.2 Anforderungen und Grundlagen	12	5.4	Ergebnisse	42
3.2.1 Normative Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln	12	6 Fazit und Zusammenfassung		42
3.2.2 Methodische Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln	14	7 Empfehlungen für das Regelwerk und weiterer Forschungsbedarf		43
3.2.3 Anforderungen an die Methodik	16	Literatur		44
3.3 Maßgebliche Ereignisszenarien	16			
3.3.1 Einleitung	16			
3.3.2 Gefahrenidentifikation/Gefahrenanalyse	16			
3.3.3 Maßgebliche Ereignisszenarien	17			
4 Anwendung der Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln	19			
4.1 Risikoanalyse	19			
4.1.1 Allgemeine Aspekte zum Vorgehen	19			
4.1.2 Ereignisbaumanalyse und Risikokenngrößen	20			
4.2 Szenariotyp Kollision	21			
4.2.1 Szenariendefinition	21			
4.2.2 Ereignisbaum	21			
4.2.3 Ereignishäufigkeiten, Schadensausmaße und resultierende Kollisionsrisiken	21			
4.3 Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“	27			
4.3.1 Szenariendefinition	27			
4.3.2 Ereignisbaum	27			
4.3.3 Ereignishäufigkeiten, Schadensausmaße und resultierende Brandrisiken	27			
4.4 Risikoberechnung und -darstellung	36			

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
A	(Schadens-)Ausmaß
ADR	Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)
DTV	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen
CFD	Computational fluid dynamics
ESAS	Empfehlungen für das Sicherheitsaudit von Straßen
ETA	Event Tree Analysis/Fehlerbaumanalyse
F	Fahrunfall
FIT	Fire In Tunnels
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
GV	Gegenverkehrs(-tunnel)
HAZOP	Hazard and Operability Analysis (Verfahrenssicherheitsstudie; Risikoanalyse-Methode)
L	(Straßen-)Länge
LP	Leichter Personenschaden
LV	Unfall im Längsverkehr
MOZ	Mittlere Ortszeit
NFPA	National Fire Protection Association (USA)
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
P	Personenschaden
PHA	Preliminary Hazard Analysis (Einleitende Gefahrenanalyse; Risikoanalyse-Methode)
PIARC	Weltstraßenverband (World Road Association)
QRA	Quantitative Risikoanalyse
RABT	Richtlinie über die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RV	Richtungsverkehrs(-tunnel)
S	Sachschaden
SO	Sonstiger Unfall
SP	Schwerer Personenschaden
StFV	Schweizerische Störfallverordnung
SV	Schwerverkehr
t	Zeit
U	Unfall
UD	Unfalldichte
UKD	Unfallkostendichte
UKR	Unfallkostenrate
UR	Unfallrate
VUA	Verkehrsunfallanzeige
W	Wahrscheinlichkeit
WOZ	Wahre Ortszeit
WU	Pauschaler Unfallkostensatz

Glossar

Begriffe „Risiko, Sicherheit“

Begriff (deutsch)	Begriff (englisch)	Erläuterung
Ausgangsereignis	Initial event	Aus den →Gefahren können verschiedene →Ereignisse entstehen. An sich ist eine unendliche Zahl an Ereignissen denkbar, die sich in Ursache, Ablauf und den dafür wesentlichen Rahmenbedingungen unterscheiden. Für eine quantitative →Risikoanalyse (QRA) wird diese Vielzahl möglicher Ereignisse auf eine begrenzte Anzahl „repräsentativer“ Ereignisse, die so genannten Ausgangsereignisse, beschränkt (siehe auch →Folgeereignis).
Eintretenshäufigkeit	Frequency	Häufigkeit, dass ein bestimmtes Ereignis innerhalb eines vorgegebenen Zeitabschnitts (häufig 1 Jahr) eintritt (siehe auch →Eintretenswahrscheinlichkeit).
Eintretenswahrscheinlichkeit	Probability	Wahrscheinlichkeit w , dass ein Ereignis innerhalb einer spezifischen Periode (z. B. 1 Jahr) eintritt. Streng genommen handelt es sich bei der →Wahrscheinlichkeit um eine dimensionslose Zahl, die nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Für den praktischen Gebrauch im vorliegenden Zusammenhang ist es aber zweckmäßig, diese Information mittels einer →Eintretenshäufigkeit darzustellen.
Ereignis	Event	Generell verwendeter Begriff, sobald aus einer →Gefahr ein Schaden entsteht (siehe auch →Ausgangsereignis, →Folgeereignis).
Ereignisbaum/ Ereignisbaumanalyse	Event tree/Event tree analysis (ETA)	Logischer Baum zur Darstellung und Quantifizierung der →Eintretenshäufigkeit und des →Schadenausmaßes möglicher →Folgeereignisse, die aus einem →Ausgangsereignis entstehen können (siehe auch →Fehlerbaum).
Fehlerbaum/ Fehlerbaumanalyse	Fault tree/ Fault tree analysis (FTA)	Logischer Baum zur Darstellung und Quantifizierung der →Eintretenshäufigkeit eines bestimmten →Ausgangsereignisses aufgrund verschiedener Ursachen und Ursachenkombinationen (siehe auch →Ereignisbaum).
Folgeereignis	Subsequent event	Aus den definierten →Ausgangsereignissen werden die möglichen →Folgeereignisse ermittelt. Folgeereignisse sind das letzte Glied in einem Ereignisablauf, wo das entsprechende →Schadenausmaß quantifizierbar ist. Hilfsmittel für das systematische Ermitteln von Folgeereignissen sind →Ereignisbäume.
Gefahr	Hazard/Danger	Zustand, aus dem ein →Ereignis mit Schadenwirkung entstehen kann (Beispiele: Brand, Stau im Tunnel etc.).
Gefährdung	Endangering	Wirkt eine →Gefahr auf ein bestimmtes Objekt, so wird aus der Gefahr eine konkrete Gefährdung (Beispiel: Brand Y wirkt auf technische Einrichtung Z).
Gefahrenanalyse	Hazard analysis	In der Gefahrenanalyse werden mögliche →Gefahren, →Gefährdungen und →Szenarien untersucht. Auch die Beschreibung möglicher Folgen kann in die Gefahrenanalyse integriert sein. Teil der →Risikoanalyse.
Nachweiszustand	Planned state	Weichen →Elemente eines Tunnels von den normativen Vorgaben ab, werden für den rechnerischen Nachweis gleicher Sicherheit zwei Zustände miteinander verglichen: →Referenzzustand und Nachweiszustand. Der Nachweiszustand entspricht dem geplanten System mit den vorgesehenen Abweichungen von Vorschriften unter Berücksichtigung der kompensierenden technischen Maßnahmen.
Referenzzustand	Reference state	Weichen →Elemente eines Straßentunnels von den normativen Vorgaben ab, werden für den rechnerischen Nachweis gleicher Sicherheit zwei Zustände miteinander verglichen: Referenzzustand und →Nachweiszustand. Beim Referenzzustand wird davon ausgegangen, dass das geplante System in allen Punkten den Vorschriften entspricht.

Begriff (deutsch)	Begriff (englisch)	Erläuterung
Risiko	Risk	Das Risiko wird als Maß für die Größe einer →Gefahr verstanden. Das Risiko wird charakterisiert durch die beiden Komponenten →Eintretenshäufigkeit (→Eintretenswahrscheinlichkeit) und →Schadenausmaß.
Risikoaversion	Risk aversion	Risiken infolge von seltenen Ereignissen mit großem Schadenausmaß werden in der Gesellschaft als schwerer wahrgenommen als vergleichbare Risiken, die sich aus einer Vielzahl kleiner Ereignisse ergeben („1 x 100 Todesopfer ≠ 100 x 1 Todesopfer“). Dieser Effekt kann in der Risikobewertung durch eine überproportionale Gewichtung – mit Hilfe eines Aversionsfaktors – von Ereignissen mit großem Ausmaß berücksichtigt werden.
Risiko, akzeptiertes	Risk, accepted	Eine absolute →Sicherheit gibt es nicht. Ein Zustand wird als sicher definiert, wenn das verbleibende Risiko akzeptierbar klein ist.
Risiko, empfundenes/bewertetes	Perceived risk	Das empfundene (oder bewertete) Risiko R_e wird, ausgehend vom kollektiven Risiko R_0 , abgeleitet, indem das Schadenausmaß A jedes Szenarios mit einem entsprechenden Aversionsfaktor $\varphi(A)$ multipliziert wird.
Risiko, individuelles	Individual risk	Gefährdung einer Einzelperson. Bezüglich des Indikators Todesopfer entspricht es der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Jahr.
Risiko, kollektives	Societal risk	Schadenerwartungswert innerhalb eines Systems. Entspricht der Summe der Risiken von →Ereignissen in einem System, im Allgemeinen bezogen auf ein Jahr.
Risikoanalyse	Risk analysis	In der Risikoanalyse geht es darum, →Gefahren, →Ereignisse und →Auswirkungen – das heißt ganze →Ereignisabläufe – zu untersuchen, um die →Eintrittshäufigkeit (→Eintretenswahrscheinlichkeit) und das →Schadenausmaß von Ereignissen zu ermitteln. Teil der →Sicherheitsbewertung.
Schadenausmaß	Consequences/ Degree of consequences	Unter dem Schadenausmaß A (Ausmaß A) eines →Ereignisses wird der entstandene Schaden verstanden. Mögliche Schäden sind z. B. Personenschäden oder Sachschäden. Das Schadenausmaß ist eine der beiden Komponenten des →Risikos.
Sicherheitsbewertung	Safety assessment	Mit einer Sicherheitsbewertung wird aufgezeigt, dass in einem definierten System (Straßentunnel X) ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Beim risikoorientierten Ansatz besteht die Sicherheitsbewertung im Wesentlichen aus drei iterativ zu durchlaufenden Schritten: <ul style="list-style-type: none"> • →Risikoanalyse. • Risikobewertung: Bewertung bzw. Beurteilung der Risiken anhand vorgängig definierter Kriterien. • Maßnahmenplanung: Evaluation und Prüfung möglicher Maßnahmen zur Reduktion der Risiken.
Sicherheitsnachweis	Safety case/Proof of safety	Im Sicherheitsnachweis wird dargelegt, dass alle in den normativen Vorgaben geforderten Maßnahmen umgesetzt sind. Gibt es Abweichungen von diesen Vorgaben oder festgestellte Risiken, sind diese ebenfalls im Sicherheitsnachweis aufgezeigt. Mit der →Sicherheitsanalyse ist nachgewiesen, dass auch mit diesen Abweichungen oder Risiken mindestens der gleiche Grad an Sicherheit erreicht wird wie bei richtlinienkonformer Ausführung.
Szenario	Scenario	Zusammenwirken mehrerer →Gefährdungen oder eine Abfolge von Gefährdungen (Beispiel: Böe führt zu Fahrtunterbrechung; Kabine bleibt im Gefahrenbereich der Lawine Y stehen; Sturm löst Lawine Y aus).
Wirkung	Effect	Eine Einwirkung ist die physikalische Wirkung einer →Gefährdung, wenn sie auftritt (Beispiel: Luftstoß, Hitzeeinwirkung etc.).

Vorgaben zur Terminologie im Kontext „Risiko und Sicherheit“ finden sich u. a. auch in den Normen [24, 25, 26, 27]. Die Begriffe werden jedoch je nach Fachgebiet teilweise unterschiedlich verwendet. Eine einheitliche

Terminologie hat sich bislang noch nicht durchgesetzt. Für die Zwecke des vorliegenden Forschungsprojektes wird deshalb von obigen Begriffsdefinitionen ausgegangen.

Begriffe „Unfallauswertung“

Begriff (deutsch)	Erläuterung
Unfallursache	Unterschieden wird gem. Unfallursachenkatalog nach allgemeinen Ursachen wie z. B. Straßenglätte oder Nebel, die dem Unfall und nicht einzelnen Beteiligten zuzuordnen sind, und den Ursachen aus personenbezogenem Fehlverhalten wie Fehler beim Überholen oder zu geringer Sicherheitsabstand der am Unfall Beteiligten.
Unfalltyp	Der Unfalltyp gibt Aufschluss über den Verkehrsvorgang der zur Entstehung des Unfalls geführt hat, d. h. die Phase des Verkehrsgeschehens, in der ein Fehlverhalten oder eine andere Ursache den weiteren Fahrtablauf nicht mehr kontrollierbar machten. Der Unfalltyp wird als dreistelliger Zahlencode angegeben. Dabei beschreibt die erste Ziffer den Grundtypen, während die folgenden beiden Ziffern („Sub-Unfalltypen“) eine detaillierte Aufschlüsselung der Konfliktsituation ermöglichen. Es werden 7 Grundtypen unterschieden.
Unfallart	Im Gegensatz zum Unfalltyp geht es bei der Unfallart nicht um die Art der Konfliktauslösung, sondern um die Beschreibung der wirklichen Kollision. Es werden 10 Unfallarten unterschieden.
Unfallkategorie	Aus der Anzahl und Art der Verkehrsbeteiligten kann auf die Schwere des Unfalls, die in Unfallkategorien ausgedrückt wird, geschlossen werden. Dabei richtet sich die Kategorie nach der schwersten Unfallfolge bzw. dem größten Schaden, den mindestens ein Beteiligter erlitten hat. Die Verkehrsunfälle werden innerhalb der Gruppe mit Personenschaden (P) nach Getöteten, Schwerverletzten und Leichtverletzten unterschieden. Verkehrsunfälle bei denen nur Sachschaden entstanden ist (S), werden nach schwerem und leichtem Sachschaden unterschieden. Eine eigene Kategorie nehmen Sachschadenunfälle mit Alkohol ein.
Unfalldichte	Die Unfalldichte (UD) ermittelt sich aus der Anzahl der Unfälle, die in einem Betrachtungszeitraum (t) auf 1 km Straßenlänge (L) entfallen. $UD = U/(L * t) [U/(km * a)] \quad (Gl. 1)$
Unfallrate	Die Unfallrate (UR) ist ein Maß für die Verkehrssicherheit eines Streckenabschnittes und beschreibt die durchschnittliche Anzahl der Unfälle (U), die auf eine Fahrleistung von 1. Mio. Kfz* km auf einen Streckenabschnitt entfallen. $UR = 10^6 * U/(365 * DTV * L * t) [U/10^6 Kfz * km] \quad (Gl. 2)$ <p>mit: DTV: durchschnittlicher täglicher Verkehr L: Länge des Untersuchungsabschnittes [km] t: Dauer des Untersuchungszeitraums [Jahre (a)]</p>
Unfallkosten	Unfallkosten beschreiben die volkswirtschaftlichen Verluste durch Straßenverkehrsunfälle. Diese setzen sich zusammen aus den Sachschadenskosten, den Reparaturkosten, den Polizeikosten, den Rechtsfolgekosten und den Verwaltungskosten der Versicherungen.
Angepasste Unfallkosten	Angepasste Unfallkosten werden auf der Grundlage der Kostensätze für Verunglückte, getrennt nach Getöteten, Schwer- und Leichtverletzten, und der Kostensätze für Sachschäden bei Unfällen gebildet. Dabei muss neben der genauen Anzahl der Getöteten, Schwer- und Leichtverletzten unter anderem die Bedingung von mindestens 100 U(P) außerorts und 400 U(P) innerorts erfüllt sein. Werden die Forderungen eingehalten, so kann eine weitere Unterteilung in direkt und indirekt angepasste Unfallkosten erfolgen.
Pauschale Unfallkosten	Liegen die Voraussetzungen für angepasste Kosten nicht vor, werden pauschale Unfallkosten angesetzt. Diese reichen in der Regel aus, um Zahl und Schwere der Unfälle zusammenzufassen und die Bedeutung und Notwendigkeit von Maßnahmen nachzuweisen Die pauschalen Unfallkosten errechnen sich nach [30] dabei wie folgt: Ist die Zahl der Unfälle mit Personenschaden (P) außerorts gleich oder größer als 10, innerorts gleich oder größer 15, sollten Unfälle mit schwerem Personenschaden (SP) und Unfälle mit leichtem Personenschaden (LV) mit den pauschalen Unfallkostensätzen WU getrennt bewertet werden: $UK(P) = U(SP) * WU(SP) + U(LV) * WU(LV) [€] \quad (Gl. 3)$ Unfälle mit Personenschaden sollten mit dem mittleren Unfallkostensatz WU(P) bewertet werden, wenn die Gesamtzahl der Unfälle mit Personenschaden kleiner ist als 10 (außerorts) bzw. 15 (innerorts): $UK(P) = U(P) * WU(P) [€] \quad (Gl. 4)$ Die Kosten der Unfälle mit Sachschaden werden ermittelt nach der Gleichung: $UK(S) = U(SS) * WU(SS) + U(LS) * WU(LS) [€] \quad (Gl. 5)$

Begriff (deutsch)	Erläuterung
Pauschale Unfallkosten	<p>... Sind die Anzahl der schwerwiegenden Unfälle mit Sachschaden und die Zahl der sonstigen Unfälle mit Sachschaden nicht zu unterscheiden, werden die Unfallkosten mit Hilfe der mittleren Unfallkostensätze $WU(S)$ abgeschätzt:</p> $UK(S) = U(S) * WU(S) \text{ [€]} \quad (\text{Gl. 6})$ <p>Die für die Berechnung der Unfallkosten jeweils nach vorhandener Unfallkategorie anzusetzenden pauschalen Unfallkostensätze werden regelmäßig von der Versicherungswirtschaft festgelegt. Aufgrund von Unterschieden in der Unfallstruktur, die aus örtlichen Rahmenbedingungen hervorgehen, wird zudem eine Unterteilung nach der Straßenkategorie vorgenommen.</p>
Unfallkostendichte	<p>Die Unfallkostendichte (UKD) gibt die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die in einem Betrachtungszeitraum auf 1 km Straßenlänge entstehen, wieder.</p> $UKD = UK / (1.000 * L * t) \text{ [1.000 € / (km * a)]} \quad (\text{Gl. 7})$ <p>mit: U: Anzahl der Unfälle im Untersuchungsraum [-] L: Länge des Untersuchungsabschnittes [km] t: Dauer des Untersuchungszeitraums [Jahre (a)]</p>
Unfallkostenrate	<p>Die Unfallkostenrate (UKR) ist wie die Unfallrate ein Maß für die Verkehrssicherheit eines Streckenabschnittes und gibt die durchschnittlichen volkswirtschaftlichen Kosten, die bei Straßenverkehrsunfällen auf einem Streckenabschnitt entstanden sind, bezogen auf eine Fahrleistung von 1.000 Kfz km wieder.</p> $UKR = 1.000 * UK / (365 * DTV * L * t) \text{ [€ / (1.000 * Kfz * km)]} \quad (\text{Gl. 8})$ <p>mit: DTV: durchschnittlicher täglicher Verkehr [Kfz/24 h] U, L, t: siehe Unfallkostendichte</p>
Dämmerung	<p>Bürgerliche Dämmerung: wird über die Möglichkeit, eine Zeitung im Freien lesen zu können, definiert und dauert in Mitteleuropa ca. 39 Minuten [35].</p> <p>Nautische Dämmerung: Im Anschluss an die bürgerliche Dämmerung werden Sterne sichtbar. Die Erkennbarkeit steigt während der nautischen Dämmerung stetig an, bis die</p> <p>Astronomische Dämmerung beginnt. Die Astronomische Dämmerung wird im üblichen Sprachgebrauch als „Nacht“ bezeichnet.</p>

Vorwort

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt das Vorgehen und die Grundlagen zum Forschungsprojekt „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln“ (FE 03.378/2004/FRB). Der Bericht dokumentiert das methodische Vorgehen zur Durchführung von Risikoanalysen gemäß der Richtlinie über die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) bzw. gemäß Artikel 13 der Richtlinie 2004/54/EG der Europäischen Kommission über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz sowie die für die Herleitung der Methodik erforderlichen Grundlagen und Auswertungen.

Im Hauptbericht sind die wesentlichen Grundlagen und das methodische Vorgehen in erster Linie aus dem Blickwinkel der Anwendung der Methodik dokumentiert. Detaillierte Angaben zur Herleitung und zu den Grundlagen finden sich in den Anhängen zum Bericht.

Die Arbeiten wurden im Zeitraum zwischen März 2005 und März 2007 unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt und von einem Betreuerkreis begleitet.

1 Einleitung und Ausgangslage

Die Brandereignisse der vergangenen Jahre in verschiedenen europäischen Straßentunneln haben verdeutlicht, welchen Gefahren Tunnelnutzer im Falle eines Fahrzeugbrandes ausgesetzt sein können. Diesem zusätzlichen Gefährdungspotenzial im Vergleich zur freien Strecke wird versucht mit Hilfe entsprechender Sicherheitsanlagen bzw. -einrichtungen entgegenzuwirken.

Damit ein möglichst einheitlicher Standard an sicherheitsrelevanten Einrichtungen in europäischen Tunneln erreicht wird, gibt die Europäische Union (EU) in der Richtlinie 2004/54/EG [1] zu Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln einen entsprechenden normativen Rahmen vor. Zur Überprüfung der Wirksamkeit einzelner Sicherheitsmaßnahmen werden darin explizit Nachweise mittels Risikoanalysen gemäß Art. 13 gefordert.¹ In

¹ Die EG-Richtlinie [1] unterscheidet Risikoanalysen gemäß Artikel 13 und Risikoanalysen, welche nicht näher spezifiziert sind. Eine entsprechende Übersicht hierzu findet sich in Anhang 1.

den deutschen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT 2006) [2] sind die Vorgaben zur Anwendung von Risikoanalysen aus [1] übernommen und punktuell ergänzt worden.

In beiden Richtlinien werden aber keine weiteren Hinweise auf die methodischen Anforderungen an die Risikoanalysen erwähnt. Die EG-Richtlinie fordert ihre Mitgliedstaaten vielmehr auf, auf nationaler Ebene eine zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln geeignete Methodik zu entwickeln. Der vorliegende Bericht dokumentiert die im Rahmen des Forschungsprojektes „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln“ (FE 03.378/2004FRB) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ausgearbeitete Methodik sowie die zugehörigen Grundlagen und Auswertungen.

Der Methodikvorschlag dient u. a. als Basis für einen bis zum 30. April 2009 durch die EU-Kommission zu erstellenden Bericht über die in den Mitgliedstaaten angewandte Praxis. Zielsetzung der EU ist es, nachfolgend einen Vorschlag zur Festlegung einer gemeinsamen, harmonisierten Methodik für Risikoanalysen auszuarbeiten.

2 Zielsetzung und Abgrenzung

2.1 Zielsetzung des Forschungsprojektes

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, eine Methodik zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln und die entsprechenden Grundlagen für die Anwendung im Rahmen der Umsetzung der EG-Richtlinie bzw. der RABT 2006 zu erarbeiten. Dazu waren folgende Zielsetzungen maßgeblich:

- Überblick zum aktuellen Stand der Sicherheitsbewertung in Straßentunneln sowie der methodischen Grundlagen zu Verfahren und Methoden zur Sicherheitsbewertung,
- Schaffung einer einheitlichen Datengrundlage bzw. Definition der erforderlichen Struktur für zukünftige Datenerhebungen, um Sicherheitsbewertungen für Straßentunnel durchführen zu können,
- Aufzeigen der systematischen Zusammenhänge und Interaktionen hinsichtlich der risikorelevanten Einflussgrößen in Straßentunneln,

- Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln auf der Basis von quantitativen Risikoanalysen.

2.2 Abgrenzung

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitete Methodik fokussiert in erster Linie auf die beiden Schadenindikatoren Personenschäden und Sachschäden. Weitergehende Aspekte wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Straßentunneln bzw. mögliche Ausfallzeiten nach Unfallereignissen oder etwaige daraus resultierende volkswirtschaftliche Schäden werden implizit in der Methodik mitberücksichtigt, jedoch nicht separat ausgewiesen.

3 Vorgehen zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln

3.1 Die risikoorientierte Sicherheitsbewertung

Eine systematische, auf einem risikoorientierten Ansatz basierende Sicherheitsbewertung besteht aus mehreren Einzelschritten, die in drei Hauptbereiche zusammengefasst werden können, wie Bild 1 zeigt:²

- **Risikoanalyse:** Die Risikoanalyse bildet die Basis der Sicherheitsbewertung. Hier werden die Gefahren identifiziert und die zu erwartenden Häufigkeiten und Schadensausmaße von Ereignissen (quantitativ) abgeschätzt. Die Risikoanalyse versucht also, vereinfacht die Frage „Was kann passieren?“ zu beantworten.
- **Risikobewertung:** Die Risikobewertung beinhaltet Vorstellungen zur Akzeptanz von Schädigungen und zur Bereitschaft, Mittel einzusetzen, um diese zu verhindern. Diese Wertungen können nicht objektiv hergeleitet werden und basieren deshalb letztlich auf einer Entscheidung der Beteiligten. Im Rahmen der Risikobewertung erfolgt eine Bewertung, ob die Sicherheit eines Systems ausreichend ist. Vereinfacht ausgedrückt

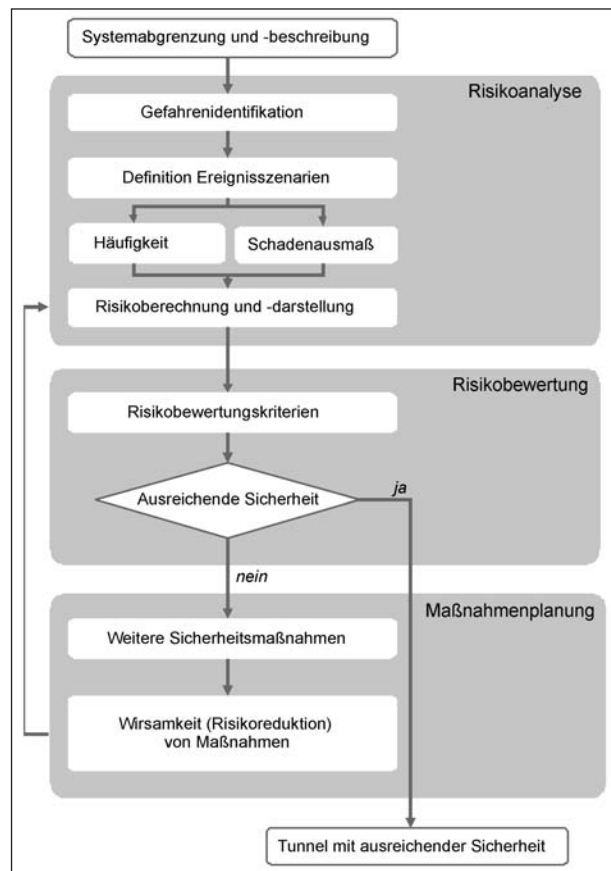


Bild 1: Elemente der risikoorientierten Sicherheitsbewertung

wird mit der Risikobewertung eine Antwort auf die Frage „Was darf passieren?“ gesucht.

- **Maßnahmenplanung:** Die Maßnahmenplanung erfolgt in mehreren Schritten von der Evaluation der risikomindernden Maßnahmen bis zur Beurteilung dieser Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit im Sinne der Risikoreduktion und ihrer Kosten. Die Maßnahmenplanung soll also die Frage „Welche Maßnahmen sind erforderlich, um das System sicher zu gestalten?“ beantworten. Die Ergebnisse der Maßnahmenplanung fließen im Sinne einer Interaktion wieder in die Risikoanalyse und die Risikobewertung ein.

3.2 Anforderungen und Grundlagen

3.2.1 Normative Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln

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. Insbe-

² Es gilt darauf hinzuweisen, dass sich international bzw. in den verschiedenen Fachgebieten bislang noch keine einheitliche Terminologie durchgesetzt hat. Die im vorliegenden Forschungsprojekt verwendeten Begriffe sind im Glossar erläutert.

sondere 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 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).³ 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. Im Rahmen einer Literaturstudie wurden verschiedene internationale normative Grundlagen (Normen, Richtlinien etc.) auf etwaige risikoorientierte Ansätze und etwaige Vorgaben zum methodischen Vorgehen hin ausgewertet. Die ausgewerteten normativen Grundlagen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

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

- Norwegen,
- Japan,
- Niederlande.

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 Verkehrsaufkom-

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°2.000-63 [4] • Circulaire interministérielle n°2.000-82 [5] • Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, fascicule 4 [6]
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]
Großbritannien	<ul style="list-style-type: none"> • BD 78/99 Design of Road Tunnels [7]
USA	<ul style="list-style-type: none"> • NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and other limited Access Highways [28]
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]

Tab. 1: Ausgewertete normative Grundlagen

men 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.

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.

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 vereinzelt. 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/PIARC [16]) verwiesen. Zudem zeigt

³ Weitergehende Informationen zur Unterscheidung dieser beiden Ansätze finden sich in Kapitel 3.2.2.

sich, dass risikoorientierte Ansätze primär im Zusammenhang mit möglichen, vergleichsweise seltenen Großereignissen wie etwa Tunnelbränden oder Freisetzungen von Gefahrgütern erwähnt bzw. gefordert werden.

Weitergehende Informationen zu den Auswertungen finden sich in Anhang 1.

3.2.2 Methodische Grundlagen zur Sicherheit in Straßentunneln

3.2.2.1 Ansätze zur Sicherheitsbewertung

Es können drei methodische Ansätze zur Sicherheitsbewertung unterschieden werden [19], wobei in der Praxis häufig Mischformen angewendet werden:

- **Empirischer Ansatz:** Der empirische Ansatz basiert weitgehend auf dem Prinzip von „trial and error“. Die Entwicklung eines sicheren Systems erfolgt dabei mehr oder weniger natürlich mit der laufenden Erfahrung bei der Benutzung. Die aus Fehlern, Störungen und Unfällen gewonnenen Erkenntnisse werden jeweils in neue Sicherheitsvorkehrungen umgesetzt. Unfälle spielen dabei eine besondere Rolle, sind sie doch immer wieder Anlass für bedeutende Weiterentwicklungen bezüglich Sicherheit mit den entsprechend erforderlichen Aufwendungen. Der empirische Ansatz ist überall dort sinnvoll, wo vergleichsweise häufig Ereignisse mit kleinen Schadenwirkungen die nötige Erfahrung für Verbesserungen liefern.
- **Maßnahmenorientierter Ansatz:** Während bei empirischen Ansätzen diejenigen Maßnahmen ergriffen werden, die sich aufgrund der Erfahrung mit Ereignissen als notwendig erweisen, orientiert man sich bei maßnahmenorientierten Ansätzen an der Frage, welche Sicherheitsmaßnahmen überhaupt zur Verfügung stehen und vorgenommen werden sollten. Das Ziel besteht darin, eine Anlage, z. B. einen Straßentunnel, durch entsprechende Maßnahmen hinreichend sicher zu gestalten, bevor sich durch Unfälle Ereignisse der Druck nach entsprechenden Maßnahmen ergibt. Beim maßnahmenorientierten Ansatz wird also ein System mit einem Stand der Technik, definierten Vorgaben oder Normen verglichen. Nicht oder nur am Rande berücksichtigt werden dabei anlagenspezifische Charakteristika.⁴ Unabhängig davon werden die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen ergriffen.

- **Risikoorientierter Ansatz:** Beim risikoorientierten Ansatz basiert die Planung von Sicherheitsmaßnahmen einerseits auf den im untersuchten System ermittelten Risiken, andererseits spielt die explizite Bewertung der Risiken eine Rolle. Der Nachweis der Sicherheit erfolgt anhand einer oder mehrerer Risikokennzahlen, die an vorgegebenen Referenzwerten gemessen werden. Der risikoorientierte Ansatz wird eher bei neuartigen und/oder komplexen Fragestellungen angewandt.

Die in den heute geltenden Normen und Richtlinien für Straßentunnel geforderten Sicherheitsmaßnahmen basieren überwiegend auf maßnahmenorientierten Ansätzen, die sich am aktuellen Stand der (Sicherheits-)Technik orientieren. Für die in der EG-Richtlinie [1] geforderte Risikoanalyse reichen diese Ansätze aufgrund der Komplexität des Systems bzw. der Wechselwirkungen zwischen den baulichen und technischen Sicherheitsmaßnahmen nicht aus. Hierzu sind risikoorientierte Betrachtungen erforderlich.

3.2.2.2 Überblick Methoden

Das Vorgehen zur Sicherheitsbewertung für Straßentunnel kann mittels qualitativer oder quantitativer Methoden erfolgen.

Die qualitativen Methoden basieren auf der Anwendung beliebig definierbarer Bewertungsmaßstäbe. Dadurch besteht die Gefahr, einerseits subjektive Eindrücke zu stark zu gewichten und andererseits systematische Zusammenhänge zwischen einzelnen Maßnahmen/Komponenten nicht vollständig zu berücksichtigen. Dies kann z. B. zum Schluss führen, dass durch eine höhere Anzahl sicherheitsfördernder Maßnahmen eine dazu proportionale Verbesserung der Sicherheit erreicht wird. Ferner sind mit diesen Methoden keine vergleichenden Aussagen, z. B. zwischen den Risiken in Straßenverkehrstunneln sowie mit Risiken aus anderen Verkehrsbereichen, möglich.

Bei den quantitativen Methoden wird hingegen versucht, mögliche Ereignisabläufe im System „Straßentunnel“ gedanklich logisch und strukturiert nachzubilden. Hierzu werden ausgehend von

⁴ Beispielsweise wird dabei nicht berücksichtigt, ob es sich um einen Tunnel mit erhöhtem oder geringem Verkehrsaufkommen handelt und damit die zu erwartende Häufigkeit eines Unfalls oder eines Brandes unterschiedlich groß sein kann.

einem Ausgangsereignis mögliche Ablaufvarianten simuliert. Die Einflussgrößen, welche die Entwicklung eines spezifischen Ereignisablaufes beeinflussen, werden identifiziert und auf ihre Ursachen hin untersucht. Darauf basierend werden für die verschiedenen, szenariospezifischen Ereignisabläufe die jeweiligen resultierenden Häufigkeiten und Schadenausmaße ermittelt und so das entsprechende Risiko bestimmt.

Wesentlicher Vorteil der quantitativen Methoden ist die transparente Darstellung der Berechnungsabläufe vom Ausgangsereignis über Folgeereignisse bis zum Endzustand, wodurch ein besseres Verständnis für komplexe Zusammenhänge erreicht werden kann.⁵

Die im Rahmen einer Sicherheitsbewertung grundsätzlich anwendbaren Methodikbausteine sind in Bild 2 in Form einer grafischen Übersicht dargestellt. Entsprechend dem Vorgehen bei einer Sicherheitsbewertung sind die Methodikbausteine gegliedert nach den drei Hauptbereichen Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung (vgl. Kapitel 3.1) aufgeführt:

- Risikoanalyse: Die Methodikbausteine können für die Risikoanalyse weitgehend als Instrumente kombiniert werden. In der praktischen Anwendung ist dies meist erforderlich, um vorhandene Datenlücken zu schließen.
- Risikobewertung: Bewertungsmethoden können normalerweise nur beschränkt kombiniert werden.
- Maßnahmenplanung: Die Wahl der Methode im Bereich der Maßnahmenplanung ist eng verbunden mit der angewendeten Beurteilungsmethodik.

⁵ „Quantifizierung begründet keine Wahrheit, aber wer auf sie verzichtet, schreckt davor zurück, sich einer immerhin kritizierbaren 'Wahrheit' überhaupt zu stellen.“ (Robert FOGEL, Nobelpreisträger Wirtschaftswissenschaften)

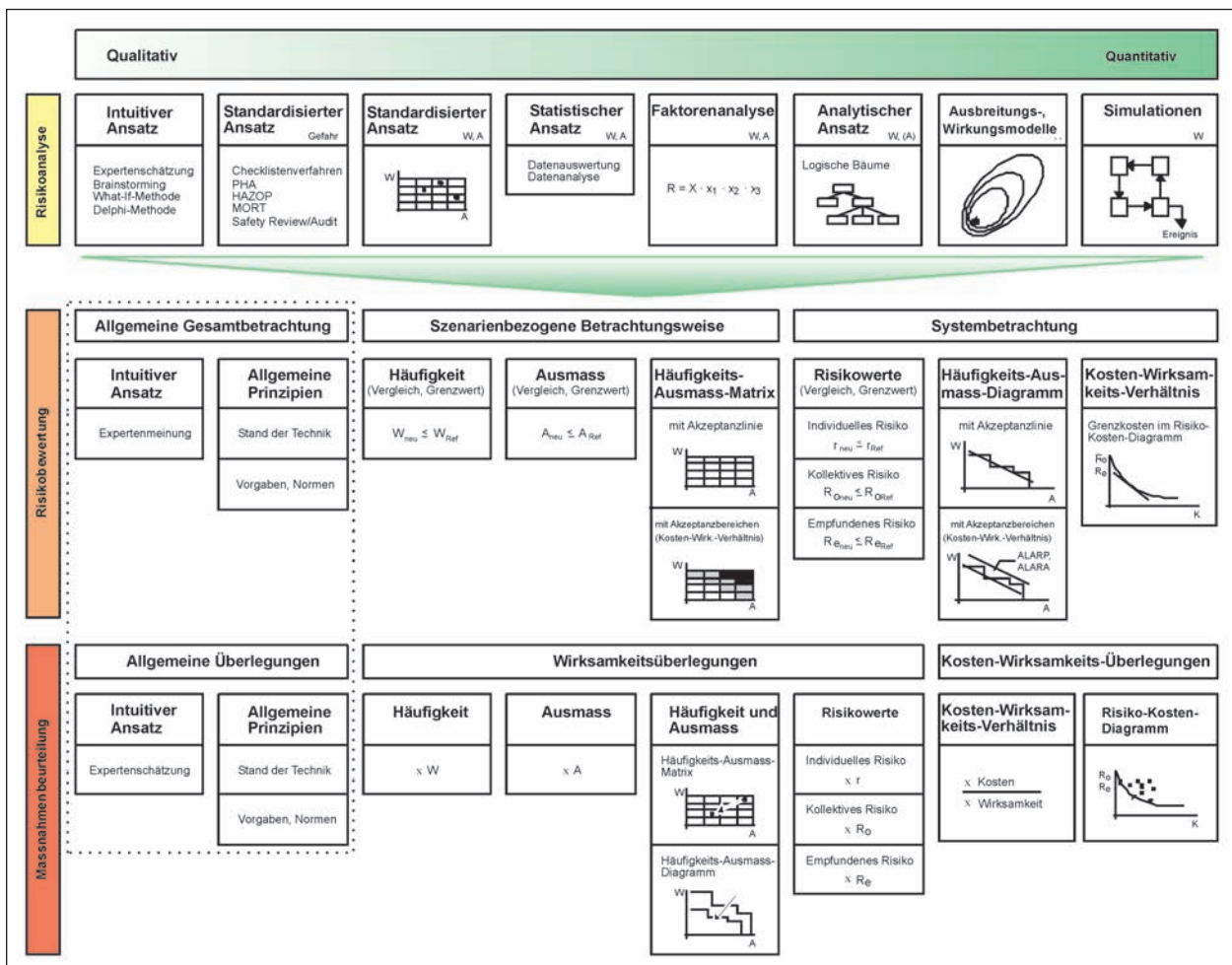


Bild 2: Überblick zu gängigen Analyse- und Bewertungsverfahren

Werden Methodikbausteine aus Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung zusammengefügt, entsteht ein Gesamtverfahren. Die Bausteine sind allerdings nicht beliebig kombinierbar. Gewisse Bewertungsmethoden bedingen bestimmte Analysemethoden und die Beurteilung von Maßnahmen wiederum ist eng an die Bewertungsmethoden gekoppelt.

Für weitergehende Informationen zu den Methodikbausteinen wird auf [19] sowie auf eine Untersuchung, die im Rahmen der Arbeiten zum europäischen Forschungsprojekt SafeT erarbeitet wurde [20], verwiesen. Weitere Informationen zu den wichtigsten Methodikbausteinen sowie Erfahrungen bei der Anwendung von qualitativen und quantitativen Methoden sind in den Anhängen 2 und 3 zusammengefasst. Ebenso finden sich dort Grundlagen zu rechnergestützten Methoden.

3.2.2.3 Methodische Anforderungen 2004/54/EG und RABT 2006

In der Richtlinie der EU [1] und in der RABT 2006 werden keine detaillierten Vorgaben zu den methodischen Anforderungen für die Sicherheitsbewertung genannt. Zusammenfassend können aber die folgenden zwei maßgeblichen inhaltlichen Stoßrichtungen aus den beiden Richtlinien abgeleitet 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.

3.2.3 Anforderungen an die Methodik

Basierend auf den Auswertungen der normativen und methodischen Grundlagen werden folgende Anforderungen an die Methodik festgelegt:

- Die Methodik soll die maßgeblichen risikorelevanten Einflussgrößen im Sinne der Risikoanalyse gemäß Art. 13 der Richtlinie 2004/54/EG [1] bzw. der RABT 2006 [2] berücksichtigen.
- Die Methodik soll auf einer quantitativen Analyse basieren.
- Die Methodik soll die in anderen Staaten gemäß Anforderung der Richtlinie 2004/54/EG [1] entwickelten methodischen Ansätze berücksichtigen, so weit dies als zweckmäßig/sinnvoll erachtet wird.
- Die Methodik soll sich hinsichtlich der berücksichtigten Schadenindikatoren an dem in Risikoanalysen üblichen Vorgehen orientieren. Es werden deshalb die beiden folgenden Schadenindikatoren berücksichtigt:
 - Personenschäden [Todesopfer]⁶,
 - Sachschäden und Verletzte [€].

3.3 Maßgebliche Ereignisszenarien

3.3.1 Einleitung

Die risikoorientierte Sicherheitsbewertung von Straßentunneln orientiert sich grundsätzlich an den drei in Kapitel 3.1 beschriebenen Elementen Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung. Das vorliegende Kapitel fasst die maßgeblichen Aspekte zur Bestimmung der wichtigsten Ereignisszenarien zusammen.

3.3.2 Gefahrenidentifikation/Gefahrenanalyse

Wie die Erfahrung zeigt, sind das Spektrum der möglichen Unfall- und Ereignisabläufe in Straßentunneln und die daraus resultierenden möglichen Personen- und Sachschäden von beträchtlicher Größe. Es hängt neben den tunnelspezifischen Charakteristiken wie etwa der baulichen Ausgestaltung, dem Vorhandensein und der Ausgestaltung von Sicherheitsmaßnahmen auch von den jeweils situationsspezifischen Merkmalen wie beispielsweise

⁶ Verletzte werden über die entsprechenden Unfallkosten dem Schadenindikator Sachschäden zugeordnet.

se der Art der beteiligten Fahrzeuge oder dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer etc. ab.

Im Rahmen der Sicherheitsbewertung werden deshalb in einem ersten Schritt die im Sinne der vorliegenden Fragestellung maßgeblichen Gefahren bzw. die daraus abgeleiteten Ereignisszenarien abgebildet und strukturiert. Die Matrix in Bild 3 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Überblick über die möglichen Ereignisabläufe. Die Matrix gibt einen strukturierten Überblick über das Spektrum der möglichen Ereignisszenarien und zeigt anhand von exemplarischen Beschreibungen mögliche Ausprägungen/Schweregrade auf. Weitergehende Informationen zu den Szenariotypen und möglichen Ereignisabläufen finden sich auch in Anhang 4.

3.3.3 Maßgebliche Ereignisszenarien

Aufgrund der Strukturierung gemäß Bild 3 kann vereinfachend eine Gliederung in fünf Szenariotypen vorgenommen werden:

- Szenariotyp „Panne“: Pannen führen im Normalfall zu keinen schweren Personen- oder Sachschäden. Vielmehr stehen die Aspekte der Be-

triebsbehinderung bzw. einer Betriebsunterbrechung im Vordergrund. Pannenszenarien sind somit aus Blickwinkel der Sicherheit vor allem als mögliche Ursache für mögliche Folgeereignisse wie beispielsweise Kollisionen oder nachfolgende Brände relevant.

- Szenariotyp „Kollision (ohne Brand)“: Je nach Ausprägung bzw. Art der Kollision sind unterschiedliche Situationen im resultierenden Schadensmaß hinsichtlich Personen- und/oder Sachschäden zu erwarten. Dabei können Kollisionen infolge von Selbstunfällen (z. B. Kollision mit Tunnelinfrastruktur) oder solche mit anderen Fahrzeugen unterschieden werden. Auch dieser Szenariotyp kann ein auslösendes Ereignis für weitere Folgeereignisse wie etwa Folgekollisionen oder Brandereignisse sein.
- Szenariotyp „Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR⁷)“: Brandereignisse in Straßentunneln

⁷ Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises par route)

Sz.	Ereigniskategorie	Involvierte Fahrzeuge bzw. Substanzen/Objekte	Schweregrad 1	Schweregrad 2	Schweregrad 3	Schweregrad 4
1	Panne	Pkw	Panne in Pannenbucht	Panne am Fahrbahnrand	Panne in der eigenen Fahrbahn	Panne, bei der beide Fahrbahnen tangiert sind.
2		Lkw				
3		Reisebus				
4	Kollision (ohne Brand)	Pkw	Kollision mit Tunnelwand	Auffahrkollision	Streif- und Frontalkollision	Schwere Frontalkollision
5		Lkw				
6		Reisebus				
7	Massenkollision		Leichte Auffahrkollision	Schwere Auffahrkollision	Frontal- und Auffahrkollisionen	Schwere Frontal- und Auffahrkollision
8	Brand (ohne Gefahr über gemäß ADR)	Pkw Panne / Kollision	Motorenbrände bzw. Kleine und einfach kontrollierbare Brände	Fahrzeugbrände bzw. mittlere und eher schwer kontrollierbare Brände	Große und schwer Kontrollierbare Brände z. B. nach Kollisionen. Große Behinderung durch Rauchentwicklung.	Unkontrollierbare Brände die sich auf zahlreiche andere Fahrzeuge übertragen. Rauch mit giftigen Gasen vermischt.
9		Lkw Panne / Kollision				
10		Reisebus Panne / Kollision				
11		Massenkollision (Pkw, Lkw, Reisebus)				
12	Ereignisse mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgütern gemäß ADR	Feste Stoffe (Explosivstoffe)	Brand der Verpackung	Abbrand	Brand / Deflagration	Explosion
13		Leichtentzündliche Flüssigkeit (Benzin)	Kleines Leck bei Durchfahrt	Lache ohne Zündung	Lache mit Zündung	Bersten des Tankes, Großbrand
14		Brennbares Gas (Propan)		Leck ohne Zündung	Freistrahbrand	Unterfeuerung (BLEVE)
15		Humantoxisches Gas (Chlor)		Mittleres Leck	Größeres Leck	Grosses Leck, sofortiger Ladungsverlust
16		Ökotoxische Flüssigkeit (Acrylnitril)				
17	Radioaktive Substanz)	Kollision ohne Strahlungsfreisetzung		Leichte Strahlungsfreisetzung im Fahrzeug	Mittlere Strahlungsfreisetzung im und um Fahrzeug	Schwere Strahlungsfreisetzung im Fahrraum
18	Wirkungen von Außerhalb des Tunnels	Gegenstände / Stoffe	Witterungseinflüsse (Nebel, Starkniederschläge, Sturm etc.)	Brand außerhalb des Tunnels mit Rauchgasausbreitung in den Tunnel	Explosion / Freisetzung toxischer Gase außerhalb Tunnel	Überflutung des Tunnels

Bild 3: Überblick über mögliche Ereignisszenarien in Tunneln

haben in den vergangenen Jahren zu einer Vielzahl von Neuerungen und Anpassungen im Bereich der normativen Vorgaben betreffend Sicherheitsmaßnahmen geführt. Aus dem Blickwinkel der vorzusehenden Sicherheitsmaßnahmen steht dieser Szenariotyp deshalb besonders im Fokus, da ein Großteil der in Normen und Richtlinien geforderten Sicherheitsmaßnahmen auf solche Szenarien ausgerichtet ist (Brandlüftung, Branddetektion etc.). Je nach Brandobjekt und -verlauf sind auch hier unterschiedliche Ausprägungen in der resultierenden Schadensschwere möglich.

- Szenariotyp „Ereignisse mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgut gemäß ADR“: Ereignisse im Zusammenhang mit der Freisetzung von Gefahrgütern in Straßentunneln sind äußerst selten, können jedoch u. U. zu erheblichen Schäden führen. Je nach Art des freigesetzten Gutes sind unterschiedliche Wirkungsarten wie Brände, Explosionen oder toxische Wirkungen möglich.
- Szenariotyp „Wirkung von außerhalb des Tunnels“: Auch Ereignisse außerhalb eines Straßentunnels können zu sicherheitsrelevanten Auswirkungen führen. Neben Witterungseinflüssen wie beispielsweise Starkniederschläge, Sturm oder Nebel können auch Naturgefahren (Überflutung, Erdbeben etc.) oder andere Wirkungen wie etwa Explosionen oder die Ausbreitung von Rauchgasen oder toxischen Gasen relevant sein. I. d. R. handelt es sich dabei aber um sehr seltene Ereignisse oder die Wirkungen im Tunnelbereich sind nur sehr gering.

Aus Blickwinkel der Sicherheit sind die Szenariotypen „Panne“ und „Wirkung von außerhalb des Tunnels“ im Vergleich zu den übrigen Szenarien von untergeordneter Bedeutung und werden deshalb aus folgenden Gründen für die Methodik nicht weiter berücksichtigt:

- Die maßgebliche Schadenwirkung für den Szenariotyp „Panne“ ist die Betriebsunterbrechung und damit kein sicherheitsrelevanter Aspekt im engeren Sinn. Zudem steht aus Blickwinkel der möglichen Maßnahmenplanung zur Minderung der Risiken mit Seitenstreifen und Pannenbuchten nur ein sehr begrenztes Spektrum an Maßnahmen zur Verfügung. Im Rahmen der vorliegenden Methodik wird dieser Szenariotyp deshalb primär als auslösendes Ereignis für mögliche Folgeereignisse berücksichtigt.

- Szenarien vom Typ „Wirkung von außerhalb des Tunnels“ sind i. d. R. sehr seltene Ereignisse bzw. ihre Wirkung im Tunnel im Normalfall nur begrenzt. Außerdem ist das Spektrum der möglichen vorzusehenden Sicherheitsmaßnahmen i. Allg. ebenfalls nur begrenzt.

Im Sinne der vorliegenden Fragestellung werden für die Methodik der Sicherheitsbewertung deshalb folgende drei Szenariotypen als maßgeblich berücksichtigt:

- Szenariotyp „Kollision (ohne Brand)“,
- Szenariotyp „Brand (ohne Gefahrgüter gemäß ADR)“,
- Szenariotyp „Ereignisse mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgut gemäß ADR“.

Für die Gefahrgutrisikoanalysen (Szenariotyp „Ereignisse mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgut gemäß ADR“) hat es sich eingebürgert, dass jeweils nicht nur ein Tunnel alleine untersucht wird, sondern dass die Risiken der Tunnelstrecke denjenigen einer möglichen Alternativroute gegenübergestellt werden. Für die Sicherheitsbewertung für diesen Szenariotyp steht ein rechnergestütztes Modell von OECD/PIARC [16] zur Verfügung, welches im Rahmen eines separaten Verfahrens einen Vergleich der Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch eine Strecke mit Tunneln und einer möglichen Umfahrstrecke erlaubt. Das Modell umfasst insgesamt 13 Freisetzungsszenarien und wird in verschiedenen Ländern (u. a. Großbritannien, Österreich, Frankreich) bereits eingesetzt.

Auch wenn die Anwendung des OECD/PIARC-Modells verhältnismäßig aufwändig ist und die Abschätzung der Schadenwirkungen die Tunnelcharakteristik und insbesondere kleinräumige Gefahrgutwirkungen nur begrenzt abbilden kann, scheint sich das Modell zu einem Standard für Gefahrgutrisikoanalysen zu entwickeln. Aus diesem Grund wird für die Sicherheitsbewertung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel im Kontext der Umsetzung der Forderungen der Richtlinien 2004/54/EG und RABT 2006 die Anwendung des OECD/PIARC-Modells oder inhaltlich gleichwertiger Modelle für die Analyse der Risiken empfohlen.⁸ Auf eine weitergehende Betrachtung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird deshalb verzichtet.

⁸ Auch in Deutschland existieren bereits gleichwertige Modelle und Erfahrungen zur Sicherheitsbewertung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel (z. B. für die Tunnelkette der BAB A 71 im Thüringer Wald mit dem Rennsteigtunnel).

4 Anwendung der Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln

Das vorliegende Kapitel zeigt das vorgeschlagene Vorgehen zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln und erläutert die zugehörigen methodischen Aspekte. Der Fokus liegt auf der Anwendung der Methodik. Für weitergehende Informationen zur Herleitung der methodischen Elemente und den ausgewerteten Grundlagen wird auf die entsprechenden Anhänge verwiesen.

4.1 Risikoanalyse

4.1.1 Allgemeine Aspekte zum Vorgehen

Es gilt der Grundsatz, dass alle Tunnel mit einer Länge von mindestens 400 m Länge gemäß den Vorgaben der RABT 2006 auszustatten bzw. zu planen und zu betreiben sind. Ein den Anforderungen der RABT 2006 entsprechender Tunnel wird als sicher erachtet.

- Entspricht ein Tunnel hinsichtlich Ausgestaltung, Sicherheitsmaßnahmen o. Ä. nicht den geltenden Vorgaben, so werden auf Basis einer Ereignisbaumanalyse (vgl. Kapitel 4.1.2) für die beiden Szenariotypen „Kollision (ohne Brand)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ die resultierenden Risiken für folgende Situationen ermittelt:
 - a) Ermittlung der Risikosituation für den zu untersuchenden Tunnel (Ausgangszustand),
 - b) Ermittlung der Risikosituation für den zu untersuchenden Tunnel unter der Annahme, dass alle Vorgaben eingehalten sind (Referenz-Zustand),
 - c) Sofern aufgrund der Analyse der Risiken für a) und b) erforderlich, werden die Risiken für den zu untersuchenden Tunnel unter Berücksichtigung von alternativen Sicherheitsmaßnahmen ermittelt.
- Um eine möglichst hohe Flexibilität der Methodik hinsichtlich der Anwendbarkeit für verschiedene Tunneltypen zu ermöglichen, werden die Risiken jeweils für jede Tunnelröhre separat ermittelt und für die Gesamtbewertung aggregiert. Damit können auch etwaige spezifische Unterschiede einzelner Tunnelröhren eines Tunnels

wie beispielsweise eine unterschiedliche Tunnelgeometrie o. Ä. berücksichtigt werden.

- Die Ermittlung der Risiken wird für die beiden oben erwähnten Szenariotypen separat vorgenommen. Dadurch kann zum einen der Stellenwert der verschiedenen Szenariotypen hinsichtlich der resultierenden Gesamtrisiken aufgezeigt werden, zum anderen kann der Einfluss von Sicherheitsmaßnahmen spezifisch für jeden Szenariotyp abgebildet werden.
- Hinsichtlich der Abgrenzung der Szenariotypen wird jeweils immer der maßgebliche Szenariotyp (worst-case) betrachtet: Z. B. wird ein Fahrzeugbrand, der sich aufgrund einer Kollision (oder Panne) ereignet, dem Szenariotyp „Brand“ und nicht dem Szenariotyp „Kollision“ zugeordnet. Dies ist insbesondere für die Abschätzung der so genannten Initialhäufigkeiten⁹ relevant. Somit wird gewährleistet, dass auch Szenarien, welche für sich noch keinen erheblichen Schaden verursachen, jedoch aufgrund möglicher Folgeereignisse zu einem größeren Schaden führen, in der Sicherheitsbewertung mitberücksichtigt werden.
- Für die Bestimmung der Personenschäden wird – wie in vergleichbaren Risikobetrachtungen üblich – die Schadengröße „Todesopfer“ herangezogen, die Sachschäden werden in Euro quantifiziert. Zusätzlich werden bei den Sachschäden über die Unfallfolgekosten auch die Folgekosten für Verletzte mitberücksichtigt. Im Rahmen der Methodik werden zusätzlich Ansätze aufgezeigt, wie die beiden Schadenindikatoren auf einer vergleichbaren monetären Basis zusammengeführt werden können.
- Die Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen im Rahmen der Sicherheitsbewertung fokussiert auf bauliche und technische Maßnahmen (insbesondere Fluchtwege und Lüftungseinrichtungen). Organisatorische und betriebliche Maßnahmen können jedoch mit dem vorgeschlagenen methodischen Vorgehen berücksichtigt werden.

⁹ Unter der Initialhäufigkeit wird die Häufigkeit verstanden, mit welcher ein bestimmtes auslösendes Ereignis (im vorliegenden Kontext ein Brand) eintritt.

4.1.2 Ereignisbaumanalyse und Risikokenngrößen

Ein zentrales Element der Risikoanalyse basiert auf einer so genannten Ereignisbaum- oder Ereignisablaufanalyse. In der Ereignisbaumanalyse werden Ereignisfolgen/-abläufe strukturiert und analysiert, die sich aus einem vorgegebenen Ausgangsereignis (Initialereignis) entwickeln können. Es handelt sich also um eine induktive Analyse, bei welcher man von einem Anfangsereignis ausgeht und mögliche Folgeereignisse hinsichtlich der Auftretenshäufigkeiten und der resultierenden Konsequenzen ermittelt (Vorwärtslogik). Damit werden die Folgen, die ein auslösendes Ereignis in einem System verursacht, schrittweise bis zu einem Endzustand des Systems verfolgt. Jedes Ereignis in dieser Kette berücksichtigt die Folgen der vorausgehenden Ereignisse. Mit Hilfe einer einfachen grafischen Darstellungsweise (so genannter Ereignisbaum, vgl. Bild 4) werden die logischen Abläufe unter Berücksichtigung der bedingten Wahrscheinlichkeit, dass die nacheinanderfolgenden Subsysteme funktionieren oder ausfallen bzw. ein bestimmter Umstand eintritt oder nicht, abgebildet und berechnet. Jeder Pfad entlang des Ereignisbaumes stellt somit eine mögliche Verkettung eines auslösenden Ereignisses und der möglichen Folgeereignisse dar.¹⁰

Aus der Häufigkeit eines Initialereignisses H_i und der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit W_{ij} , dass die nacheinander folgenden Subsysteme funktionieren oder ausfallen bzw. ein bestimmter Umstand eintritt oder nicht, sowie dem resultierenden Ausmaß A_{ij} eines Ereignisablaufs j kann das zugehörige kollektive Risiko R_{ij} berechnet werden:

$$R_{ij} = H_i \cdot W_{ij} \cdot A_{ij}$$

Das kollektive Risiko entspricht langfristig dem mittleren Schaden und stellt somit einen Schadenerwartungswert dar.

Neben der Ermittlung der kollektiven Risiken lassen sich die Ergebnisse der Ereignisbaumanalyse über-

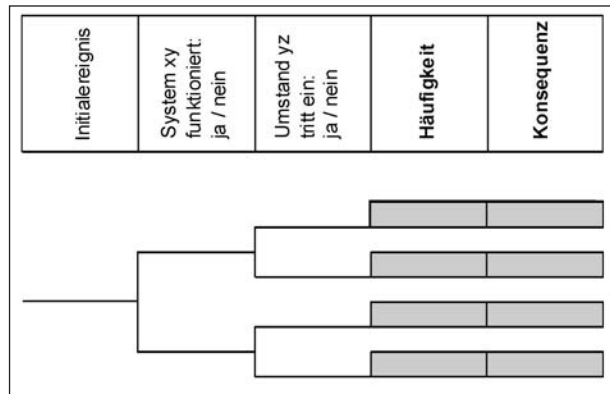


Bild 4: Beispiel der grafischen Darstellung einer Ereignisbaumanalyse

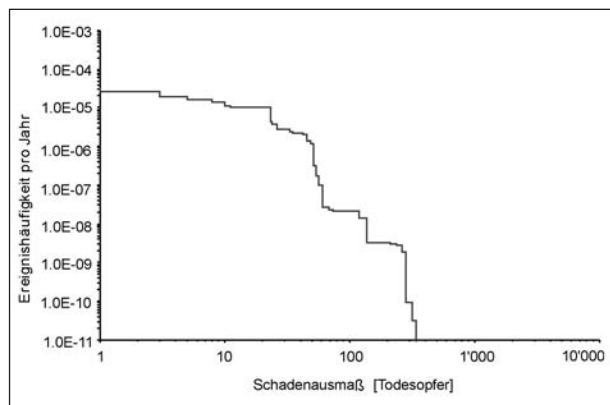


Bild 5: Beispiel Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Summenkurve

dies in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen darstellen: Durch Summation der Häufigkeiten

$$H_{ij} = H_i \cdot W_{ij}$$

über alle Ereignisszenarien, deren Schadenausmaß größer oder gleich einem vorgegebenen Wert ist, kann die kumulative Häufigkeit für jedes Schadenausmaß ermittelt werden. Die grafische Darstellung dieser kumulativen Häufigkeitsverteilung in einem doppelt-logarithmischen Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm entspricht der so genannten Summenkurve. Sie kann für einzelne Szenariotypen oder die resultierenden Gesamtrisiken dargestellt werden (vgl. Beispiel in Bild 5). Das kollektive Risiko entspricht der Fläche unter der Summenkurve im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm.

Der strukturelle Aufbau der in der vorliegenden Methodik verwendeten Ereignisbäume wird aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit und einfacheren Anwendbarkeit möglichst einfach gehalten. Die Wirkung der maßgeblichen Einflussgrößen wie etwa der tunnelspezifischen Charakteristika oder des Verkehrsaufkommens wird bei der Bestimmung

¹⁰ Theoretisch werden bei der Ereignisbaumanalyse im Sinne der binären Logik jeweils immer zwei Verzweigungen berücksichtigt (z. B. „funktioniert/funktioniert nicht“). In der Praxis ist es jedoch üblich, auch mehrere Verzweigungen an den Knoten des Ereignisbaumes darzustellen, um so die Möglichkeit mehrerer Systemzustände über eine einzige Verzweigung im Ereignisbaum abbilden zu können und die Komplexität und den Umfang des Ereignisbaumes zu begrenzen.

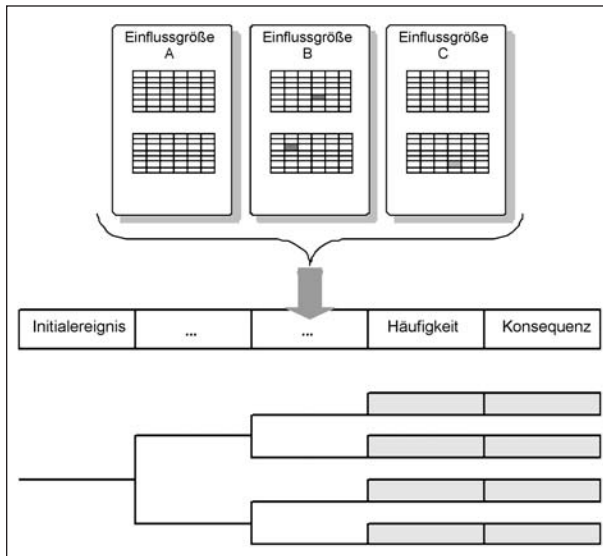


Bild 6: Prinzipielles Vorgehen zur Berücksichtigung risikorelevanter Einflussgrößen mit Wahrscheinlichkeitstabellen (oben) im Ereignisbaum (unten)

der Häufigkeiten und der bedingten Wahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum berücksichtigt. Dazu werden die maßgeblichen risikorelevanten Einflussgrößen so weit möglich kategorisiert/klassiert, um die Bestimmung der bedingten Wahrscheinlichkeiten für den Anwender der Methodik möglichst einfach zu halten. Bild 6 soll dieses prinzipielle Vorgehen illustrieren.

Für die vorliegende Methodik werden risikorelevante Einflussgrößen spezifisch gegliedert und teilweise tabellarisch aufbereitet. Für die Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeiten werden die jeweiligen relevanten Einflussgrößen herangezogen und über Skalierungsfaktoren die für den spezifisch zu untersuchenden Tunnel bestimmt.

Um die in den Richtlinien 2004/54/EG und RABT 2006 geforderte Beurteilung von Maßnahmen aus dem Blickwinkel der Kosten-Wirksamkeit vornehmen zu können, ist es erforderlich, die Risiken zu monetarisieren, um sie so möglichen Maßnahmenkosten gegenüberstellen zu können. Das Vorgehen hierzu wird nachfolgend beschrieben.

4.2 Szenariotyp Kollision

4.2.1 Szenariodefinition

Der Szenariotyp „Kollision (ohne Brand)“ umfasst folgende Teilszenarien:

- Fahrnfall (Unfalltyp 1 gemäß [30]; Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur),

- Einbiegen/Kreuzen-Unfall (Unfalltyp 3 gemäß [30], Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel),
- Unfall im Längsverkehr (Unfalltyp 6 gemäß [30], z. B. Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel in einem Richtungsverkehrstunnel)
- sonstiger Unfall (Unfalltyp 7 gemäß [30]; z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Weitergehende illustrierende Erläuterungen zu möglichen Ereignisabläufen und -szenarien finden sich in Anhang 4. Eine Zusammenstellung aller Unfalltypen mit Untertypen ist in Anhang 6 aufgeführt.

4.2.2 Ereignisbaum

Bild 7 und Bild 8 zeigen die Struktur des Ereignisbaumes für den Szenariotyp Kollision (für die Schadenindikatoren Personenschäden und Sachschäden/Verletzte). Der Ausschnitt zeigt die Verzweigungspunkte im Ereignisbaum und enthält die Elemente der Ausmaßberechnung (inkl. der monetarisierten Risiken), einzeln nummeriert von 1 bis 10. Die vollständigen Ereignisbäume für die beiden berücksichtigten Schadenindikatoren sind in Anhang 5 dargestellt. Für die Berechnung der Risiken infolge einer Kollision werden nachfolgend die Einflussfaktoren zur Bestimmung der Häufigkeiten/Wahrscheinlichkeiten und der resultierenden Schadenausmaße sowie die dazu erforderlichen Vorgehensschritte erläutert. Dabei werden die Vorgehensschritte jeweils entsprechend den Verzweigungspunkten im Ereignisbaum gegliedert.

4.2.3 Ereignishäufigkeiten, Schadenausmaße und resultierende Kollisionsrisiken

Verzweigung 1: Häufigkeit des Initialereignisses Kollision

Beim Initialereignis handelt es sich um die für einen bestimmten Tunnel bzw. für eine bestimmte Tunnelröhre zu erwartende Häufigkeit, mit welcher eine Kollision stattfindet. Auf Basis einer umfangreichen Auswertung von insgesamt 979 Unfallereignissen in 80 Tunneln in Deutschland wurden in Abhängigkeit der Tunnelcharakteristika statistische Basiswerte für die Bestimmung der Kollisionshäufigkeiten ermittelt. Dabei wurden folgende Einflussgrößen als maßgeblich ermittelt:

- Tunneltyp/Verkehrsart,

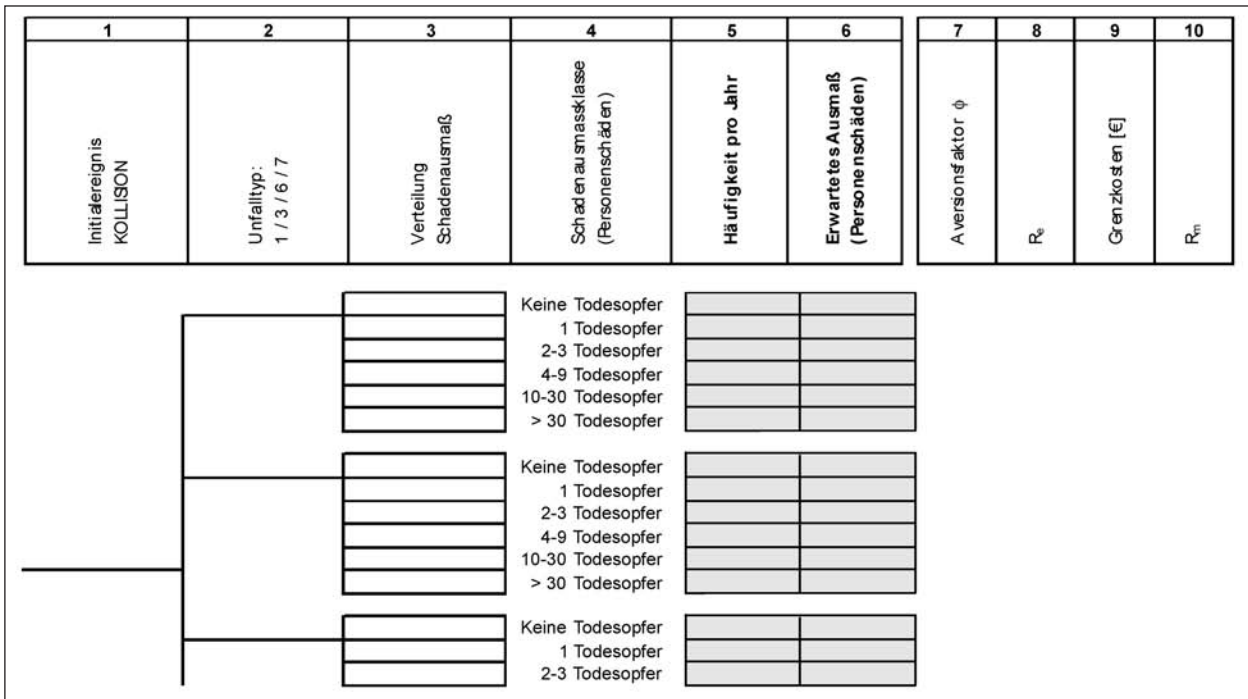


Bild 7: Struktur Ereignisbaum Szenariotyp „Kollision (ohne Brand)“ für den Schadenindikator Todesopfer

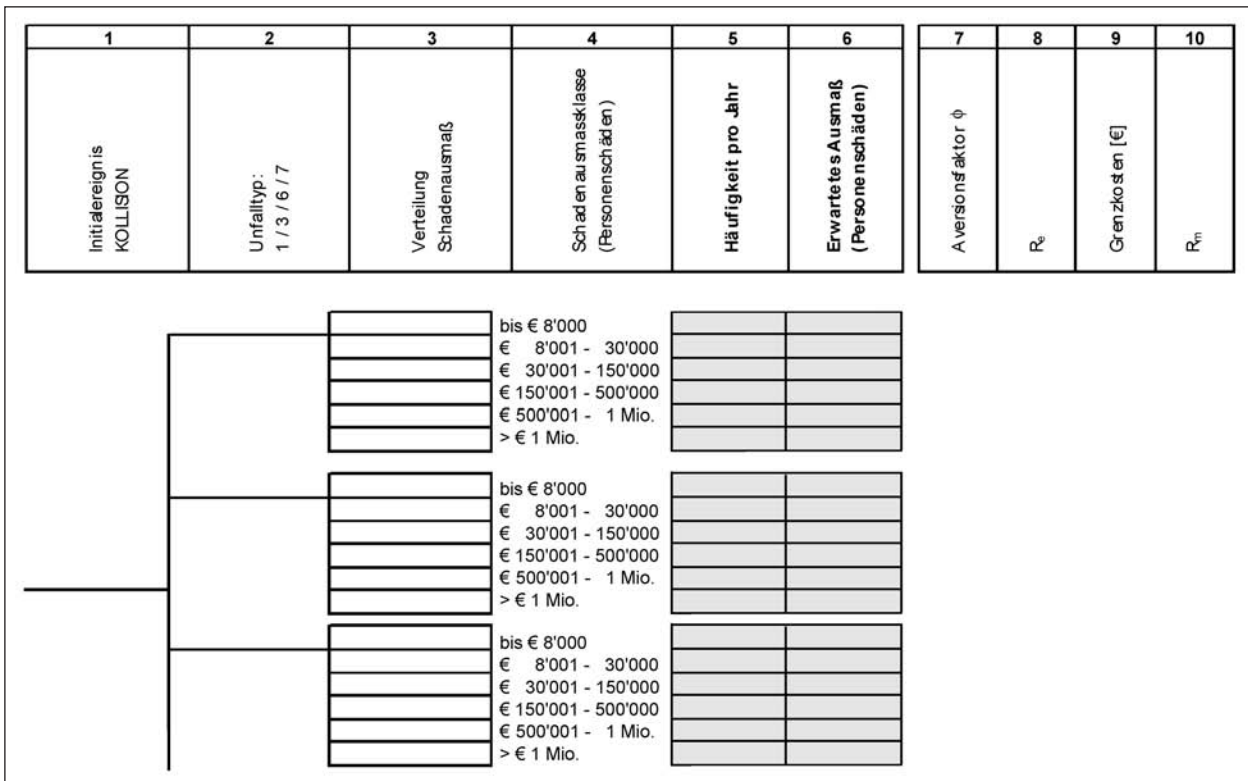


Bild 8: Struktur Ereignisbaum Szenariotyp „Kollision (ohne Brand)“ für Sachschäden und Verletzte

- Tunnellänge,
- Verkehrsaufkommen (DTV),
- Tunnel mit bzw. Tunnel ohne Zu- und/oder Abfahrten.

Für die Bestimmung der jährlichen Häufigkeit einer Kollision in einem spezifischen Tunnel ist von der nachfolgenden Formel sowie Tabelle 2 auszugehen. Die Initialhäufigkeit einer Kollision für eine Tunnelröhre kann gemäß folgender Formel ermittelt werden:

$$H_{\text{Kol}} = \alpha \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{Röhre}} \cdot 365$$

H_{Kol} : Häufigkeit einer Kollision in der betrachteten Tunnelröhre [1/Jahr]

α : Statistisch korrigierte Unfallrate [1/(Fzg * km)]

$\text{DTV}_{\text{Röhre}}$: Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre [Fzg/Tag]

L: Länge der untersuchten Tunnelröhre [km]

Hinsichtlich der Anwendung für Gegenverkehrstunnel ist Folgendes zu beachten: Weist nur eine der beiden Fahrrichtungen im Tunnel eine Zu-/Abfahrt auf, so ist die resultierende Kollisionshäufigkeit über eine proportionale Aufteilung des DTV zu ermitteln.¹¹

Auf Basis der Unfallanalyse kann eine mittlere Kollisionsrate von $6 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fahrzeug*km)] abgeleitet werden. In der Abschätzung gemäß der obigen Formel ist auch berücksichtigt, dass Kollisionen auch aufgrund von Pannen (z. B. Auffahren auf ein liegen gebliebenes Fahrzeug) möglich sind.

Die Häufigkeit einer Kollision kann zusätzlich von weiteren Einflussgrößen abhängig sein, wie beispielsweise:

- spezielle Charakteristik hinsichtlich Kurvigkeit und Gefälleverhältnissen,

Tunneltyp	Tunnel mit Zu-/Abfahrten	Tunnel ohne Zu-/Abfahrten
Richtungsverkehrstunnel	$5.28 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fzg * km)]	$2.28 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fzg * km)]
Gegenverkehrstunnel	$9.81 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fzg * km)]	$6.81 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fzg * km)]

Tab. 2: Korrigierte Unfallrate α zur Abschätzung der Kollisionshäufigkeit (gemäß Anhang 7)

¹¹ Beispiel: Gegenverkehrstunnel mit 3 Fahrstreifen infolge ungleicher Verkehrsbelastung (1 in Richtung A, 2 in Richtung B), Länge 2 km, DTV: 25.000 Fzg./d, Fahrtrichtung A mit Zu-/Abfahrt:

- Kollisionshäufigkeit in Richtung A: $9.81 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug * km] * 2 km * (25.000/3) * 365 = 6 Unfälle pro Jahr.

- Kollisionshäufigkeit in Richtung B: $6.81 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug * km] * 2 km * (25.000/2 * 3) * 365 = 8 Unfälle pro Jahr.

Insgesamt sind also 14 Unfälle pro Jahr zu erwarten.

- zulässige bzw. effektive gefahrene Geschwindigkeit bzw. Verkehrsbeeinflussungsmöglichkeiten,
- Vorhandensein von Pannenbuchten und/oder Seitenstreifen,
- Stauhäufigkeit.

Im Rahmen der Auswertungen zur Unfallanalyse ließen sich aufgrund der Vielzahl von weiteren Einflussgrößen, deren Interaktion und der derzeit daraus folgenden geringen Anzahl vergleichbarer Tunnel noch keine quantitative Korrelation zwischen den statistischen Kollisionsraten und entsprechenden Einflussgrößen finden. Ist also für eine zu untersuchende Tunnelröhre eine gegenüber den statistischen Mittelwerten abweichende Kollisionsrate zu erwarten, so sind die gemäß Berechnungsformel resultierenden Kollisionshäufigkeiten um einen untersuchungsspezifisch abzuschätzenden Faktor zu korrigieren.

Detaillierte Informationen zur Unfallanalyse und zur Herleitung der Kollisionsraten finden sich in den Anhängen 6 und 7.

Verzweigung 2: Unfalltyp 1/3/6/7

Je nach Art und Verlauf der Kollision resultieren unterschiedliche Personen- und/oder Sachschäden. Im Rahmen der Unfallanalyse (Anhang 6) wurde dieser Aspekt ebenfalls untersucht. Dabei wurden zur Einteilung in Kategorien die Unfalltypen gemäß [30] herangezogen. Folgende Faktoren haben einen Einfluss auf die Verteilung:

- Tunneltyp/Verkehrsart,
- Tunnellänge,
- Tunnel mit bzw. Tunnel ohne Zu- und/oder Abfahrten.

Auf Basis der Unfallauswertung kann die in Tabelle 3 dargestellte Verteilung der bedingten Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Unfalltyps in Abhängigkeit der oben genannten Einflussgrößen abgeleitet werden.

Analog zur Kollisionshäufigkeit können grundsätzlich auch weitere zusätzliche Faktoren einen Einfluss auf die Verteilung der Unfalltypen haben. Im Rahmen der Unfallanalyse ließen sich jedoch auf Basis der vorliegenden Grundlegendaten keine entsprechenden Zusammenhänge schlüssig ausweisen.

	Unfalltyp 1		Unfalltyp 3		Unfalltyp 6		Unfalltyp 7	
	Mit Zu-/Abfahrt	Ohne Zu-/Abfahrt	Mit Zu-/Abfahrt	Ohne Zu-/Abfahrt	Mit Zu-/Abfahrt	Ohne Zu-/Abfahrt	Mit Zu-/Abfahrt	Ohne Zu-/Abfahrt
Richtungsverkehrstunnel								
< 600 m	19.2 %	46.2 %	15.9 %	0.0 %	52.2 %	23.1 %	12.8 %	30.8 %
600 – 1.200 m	10.2 %	24.4 %	9.1 %	0.0 %	72.6 %	56.1 %	8.2 %	19.5 %
≥ 1.200 m	7.8 %	12.8 %	3.9 %	0.0 %	83.0 %	78.5 %	5.3 %	8.7 %
Gegenverkehrstunnel								
< 600 m	13.0 %	15.2 %	28.9 %	0.0 %	28.5 %	50.0 %	29.7 %	34.8 %
600 – 1.200 m	7.1 %	9.9 %	13.3 %	0.0 %	63.5 %	67.6 %	16.2 %	22.5 %
≥ 1.200 m	1.7 %	2.7 %	4.6 %	0.0 %	91.5 %	93.6 %	2.3 %	3.7 %

Tab. 3: Verteilung der Unfalltypen

Verzweigung 3: Verteilung Schadenausmaß

Je nach Verlauf und spezifischen Umständen bei einer Kollision können unterschiedliche Schadenfolgen resultieren. Solche zufälligen Gegebenheiten können in einer Risikoanalyse nur bedingt abgebildet werden. Um das mögliche Spektrum der Folgen einer Kollision berücksichtigen zu können, wurden im Zuge der Unfallanalyse die Schadenausmaßverteilungen für die vier maßgeblichen Unfalltypen 1, 3, 6 und 7 ausgewertet und in Klassen gemäß Verzweigung 4, eingeteilt. Für die Festlegung der Sachschäden und die Zuordnung der Verletzten zu den Sachschäden wurden die Grundlagen gemäß ESAS [47] herangezogen.

Während für die Abschätzung der Verteilung der Sachschäden eine hinreichende statistische Grundlage vorliegt, fehlt eine ausreichende Datenbasis für Unfälle mit Todesopfern. Im Untersuchungszeitraum (insgesamt 3 Jahre) haben sich insgesamt 6 Unfälle mit Todesfolge ereignet. Bei allen ausgewerteten Ereignissen kam jeweils eine Person ums Leben. Aus diesem Grund basieren die Werte der Schadenausmaßverteilung für Personenschäden in Tabelle 4 weitgehend auf Annahmen.¹²

Für die Bestimmung der Verteilung der Schadenausmaße für die beiden Schadenindikatoren bei der Anwendung der Methodik kann von den in Tabelle 4 und 5 dargestellten Klassen und zugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeiten ausgegangen werden

Lassen spezifische Tunnelleigenschaften wie beispielsweise ein stark überdurchschnittliches Aufkommen an Schwerverkehr, eine spezielle Charakteristik hinsichtlich Kurvigkeit und Gefälleverhältnis-

se usw., begründet vermuten, dass die Schadenausmaßverteilung für die vier Unfalltypen signifikant von den Werten in den Tabellen 4 und 5 abweicht, so ist fallweise eine entsprechende Anpassung zu prüfen.

Verzweigung 4: Schadenausmaßklasse

Einteilung der Schadenfolgen für die Schadenindikatoren Personen- und Sachschäden in Klassen, für welche die entsprechenden Häufigkeiten ermittelt werden.¹³

Verzweigung 5: Häufigkeit pro Jahr

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

Verzweigung 6: Erwartetes Schadenausmaß

Stellvertretend für die jeweiligen Schadenausmaßklassen in Spalte 4 wird für die Berechnung der Risiken von den in Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengestellten Werten für die beiden Schadenindikatoren Personenschäden und Sachschäden ausgegangen.

¹² Dies gilt insbesondere für Ereignisse mit großem Schadenausmaß (mehr als 30 Todesopfer). Zu solchen sehr seltenen Ereignissen liegen keine Erfahrungswerte vor, dennoch können sie aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden (z. B. Kollision zweier Reisebusse o. Ä.).

¹³ In den Sachschäden sind zusätzlich auch die Unfallkosten gemäß ESAS [47] für Verletzte mitberücksichtigt (€ 85.000.- pro Schwerverletztem bzw. € 3.750.- pro Leichtverletztem). Dies wurde auch in der Unfallanalyse so mitberücksichtigt.

	Keine Todesopfer	1 Todesopfer	2-3 Todesopfer	4-9 Todesopfer	10-30 Todesopfer	> 30 Todesopfer
Unfalltyp 1	99.25 %	0.59 %	0.15 %	0.01 %	0.0001 %	0.00001 %
Unfalltyp 3	99.50 %	0.42 %	0.07 %	0.01 %	0.0001 %	0.00001 %
Unfalltyp 6	99.00 %	0.72 %	0.27 %	0.01 %	0.0001 %	0.00001 %
Unfalltyp 7	99.50 %	0.42 %	0.07 %	0.01 %	0.0001 %	0.00001 %

Tab. 4: Verteilung Schadenausmaß Personenschäden

	bis € 8.000	€ 8.001 - 30.000	€ 30.001 - 150.000	€ 150.001 - 500.000	€ 500.001 - 1 Mio.	> € 1 Mio.
Richtungsverkehrstunnel						
Unfalltyp 1	52.0 %	34.0 %	13.0 %	0.89 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 3	81.5 %	17.0 %	1.0 %	0.39 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 6	68.5 %	19.5 %	10.5 %	1.39 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 7	83.0 %	11.0 %	3.0 %	2.89 %	0.1 %	0.01 %
Gegenverkehrstunnel						
Unfalltyp 1	21.5 %	60.5 %	16.0 %	1.89 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 3	76.0 %	19.0 %	3.0 %	1.89 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 6	69.0 %	29.0 %	1.0 %	0.89 %	0.1 %	0.01 %
Unfalltyp 7	60.0 %	28.0 %	11.0 %	0.89 %	0.1 %	0.01 %

Tab. 5: Verteilung Schadenausmaß Sachschäden (inkl. Unfallkosten für Verletzte)

Schadenausmaßklasse	Erwartetes Ausmaß
Keine Todesopfer	0 Todesopfer
1 Todesopfer	1 Todesopfer
2-3 Todesopfer	2 Todesopfer
4-9 Todesopfer	5 Todesopfer
10-30 Todesopfer	15 Todesopfer
> 30 Todesopfer	35 Todesopfer

Tab. 6: Schadenausmaßklassen Personenschäden

Schadenausmaßklasse	Erwartetes Ausmaß
bis € 8.000	€ 1.000
€ 8.001 - 30.000	€ 5.000
€ 30.001 - 150.000	€ 30.000
€ 150.001 - 500.000	€ 300.000
€ 500.001 - 1 Mio.	€ 700.000
> € 1 Mio.	€ 1.200.000

Tab. 7: Schadenausmaßklassen Sachschäden¹⁴

Verzweigung 7: Aversionsfaktor φ

Der Gesamtschaden, der durch Unfälle in einem Straßentunnel entstehen kann, lässt sich wie eingangs beschrieben durch das kollektive Risiko ausdrücken. Dieser Wert entspricht dem langjährigen 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 dieses Schadenerwartungswertes 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 gleiche statistische Schadenerwartungswerte ausgewiesen werden, anders beurteilt werden, wenn sich ihre Schadenausmaße deutlich unterscheiden: Erfahrungsgemäß werden Unfälle mit großen Auswirkungen in der Gesellschaft ungleich schlimmer empfunden 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.

¹⁴ Vgl. Fußnote 13

Schadenausmaß Sachschäden	Risiko-Aversionsfaktor j
< € 5 Mio.- pro Ereignis	1
≥ € 5 Mio.- pro Ereignis	3

Tab. 8: Risikoaversionsfaktoren für Sachschäden infolge Kollision

Die spezielle Gewichtung von Großereignissen sowie nicht direkt erfasster indirekter Schäden kann über die so genannte Risikoaversion berücksichtigt werden. 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. Weitergehende Informationen zum Aspekt der Risikoaversion und den entsprechenden methodischen Ansätzen sind in Anhang 8 dargestellt.

Für die Anwendung im Rahmen dieser Methodik wird für Personenschäden von folgendem Aversionsfaktor φ in Abhängigkeit des effektiven Schadenausmaßes ausgegangen:

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

Für Sachschäden wird der Aversionsfaktor φ wie in Tabelle 8 dargestellt bestimmt.

Verzweigung 8: Bewertetes Risiko R_e

Für kollektive, mit einem Aversionsfaktor gewichtete Risiken wird die Bezeichnung bewertetes (oder „empfundenes“) kollektives Risiko R_e verwendet, das wie folgt bestimmt wird:

$$R_e = \sum_{i,k} H_{ik} \cdot A_{ik} \cdot \varphi_k(A_{ik})$$

R_e : bewertetes Risiko [Todesopfer/Jahr] bzw. [€/Jahr]

H_{ik} : Unfallhäufigkeit [1/Jahr]

A_{ik} : Ausmaß [Todesopfer, € etc.]

$\varphi(A)$: Aversionsfaktor [-]

i: bezeichnet das Ereignis

k: bezeichnet den Schadenindikator (Todesopfer, Sachschäden etc.)

Verzweigung 9: Grenzkosten

Wie die Erfahrung zeigt, werden in der Praxis die Sicherheitsbemühungen zur Minderung der Risiken, welche von einem System oder einer Anlage ausgehen, nur bis zu einem gewissen Punkt vorgenommen. Damit wird deutlich, dass der Aufwand für Sicherheitsmaßnahmen und die als akzeptabel bewerteten Risiken in einem direkten Zusammenhang stehen. Um aus Blickwinkel der Kosten-Wirksamkeit adäquate Maßnahmen zu treffen, ist derjenige (finanzielle bzw. monetarisierte) Aufwand gerechtfertigt, bei welchem Aufwand und Sicherheitszuwachs gerade noch in einem vorgegebenen, als angemessen erachteten Verhältnis stehen. Für diesen Grenzwert der Kosten-Wirksamkeit wird der Begriff „Grenzkosten“ verwendet. Sie sind ein Maß für die Zahlungsbereitschaft, um risikomindernde Maßnahmen zu ergreifen. Über die Grenzkosten können die ermittelten bewerteten Risiken in monetären Einheiten ausgedrückt werden.

Weitergehende Erläuterungen zum Prinzip der Grenzkosten und zum Ansatz der Kosten-Wirksamkeit als Bewertungsinstrument finden sich im Anhang 8 und in Kapitel 4.5. Für die Risiken in Straßentunneln infolge von Kollisionen ist von folgenden Grenzkosten auszugehen:

- € 5 Mio. pro gerettetem Menschenleben,
- € 3.- pro € 1.- verhindertem Sachschaden.

Verzweigung 10: Monetarisiertes Risiko R_m

Das bewertete Risiko R_e wird monetarisiert, indem es mit den Grenzkosten multipliziert wird.

Das monetarisierte Risiko R_m wird somit – wie bereits eingangs aufgeführt – wie folgt berechnet:

$$R_m = \sum_{i,k} H_{ik} \cdot A_{ik} \cdot \varphi_k(A_{ik}) \cdot G_k$$

R_m : monetarisiertes Risiko [€/Jahr]

H_{ik} : Unfallhäufigkeit [1/Jahr]

A_{ik} : Ausmaß [Todesopfer, € etc.]

$\varphi(A)$: Aversionsfaktor [-]

G_k : Grenzkosten [€/Schadeneinheit]

i: bezeichnet das Ereignis

k: bezeichnet den Schadenindikator (Todesopfer, Sachschäden etc.)

4.3 Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“

4.3.1 Szenariendefinition

Der Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ umfasst folgende Teilszenarien:

- Brand mit einer Brandleistung von 5 MW (z. B. Brand eines Pkw),
- Brand mit einer Brandleistung von 30 MW (z. B. Brand eines Lkw/Reisebusses),
- Brand mit einer Brandleistung von 50 MW (z. B. Brand eines Lkw),
- Brand mit einer Brandleistung von 100 MW (z. B. Brand zweier Lkw nach einer Kollision).

Weitergehende illustrierende Erläuterungen zu möglichen Ereignisabläufen und -szenarien finden sich in Anhang 4

Das Szenario „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ berücksichtigt auch Brandereignisse als Folge von Pannen oder Kollisionen. Brandereignisse infolge eines Brandes von betriebstechnischen Einrichtungen werden aufgrund ihrer geringen Bedeutung nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden wie erwähnt Brandereignisse im Zusammenhang mit Beteiligung von Gefahrgut, da hierzu im Rahmen eines separaten Verfahrens

auf das OECD/PIARC-Modell [16] oder gleichwertige Modelle zurückgegriffen werden kann.

4.3.2 Ereignisbaum

Die Bilder 9 und 10 zeigen die Struktur des Ereignisbaumes für den Szenariotyp Brand. Der Ausschnitt zeigt die Verzweigungspunkte im Ereignisbaum und enthält die Elemente der Ausmaßberechnung (inkl. der monetarisierten Risiken), einzeln nummeriert von 1 bis 14. Die vollständigen Ereignisbäume für die beiden berücksichtigten Schadenindikatoren sind in Anhang 5 dargestellt.

Für die Berechnung der Risiken infolge eines Brandes werden nachfolgend die Einflussfaktoren zur Bestimmung der Häufigkeiten/Wahrscheinlichkeiten und der resultierenden Schadenausmaße sowie die dazu erforderlichen Vorgehensschritte erläutert. Dabei werden die Vorgehensschritte jeweils entsprechend den Verzweigungspunkten im Ereignisbaum gegliedert.

4.3.3 Ereignishäufigkeiten, Schadenausmaße und resultierende Brandrisiken

Verzweigung 1: Initialereignis Brand

Brände in Straßentunneln sind insgesamt verhältnismäßig seltene Ereignisse und entstehen in erster Linie als Folge einer Panne bzw. eines techni-

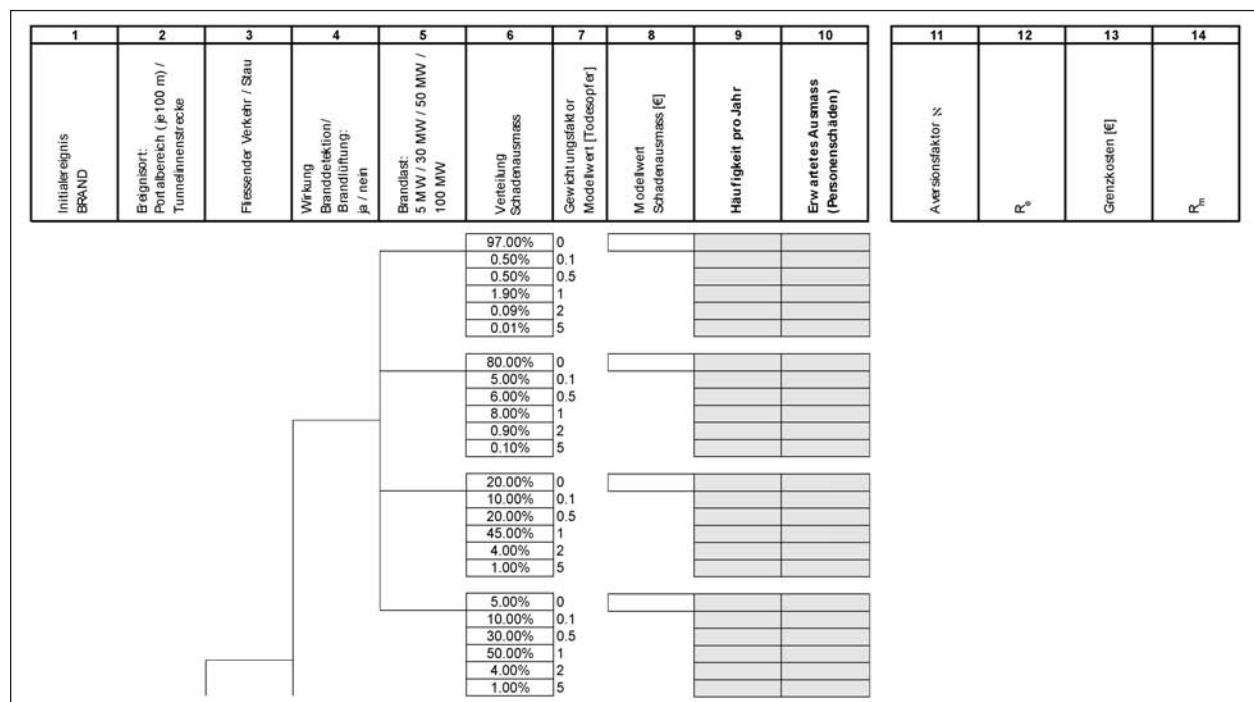


Bild 9: Struktur Ereignisbaum Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ für den Schadenindikator Todesopfer

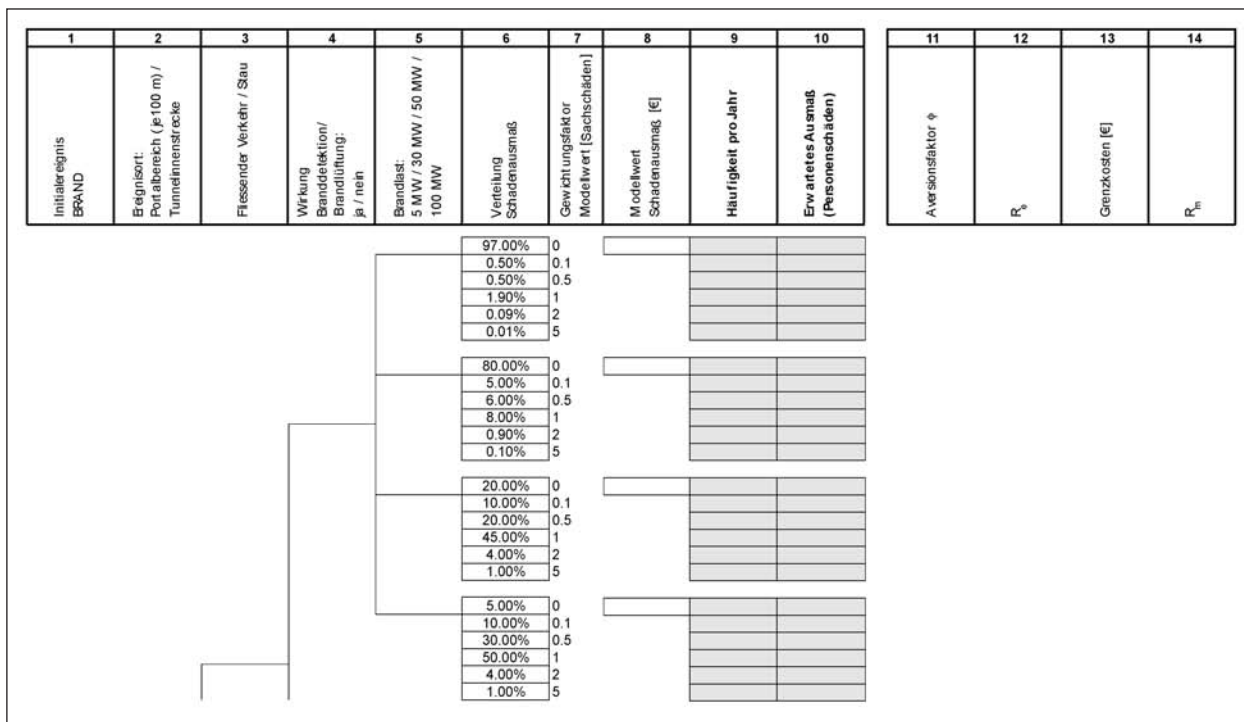


Bild 10: Struktur Ereignisbaum Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ für Sachschäden und Verletzte

schen Defekts (z. B. Motorenbrand) oder einer Kollision. Wie die Erfahrung zeigt, sind es überwiegend technische Defekte, welche zu Bränden führen.

Im Rahmen der Unfallauswertungen hat sich gezeigt, dass im Betrachtungszeitraum von 3 Jahren insgesamt lediglich 3 Brände infolge von Kollisionen zu verzeichnen waren.¹⁵ Dementsprechend lassen sich auch für das Initialereignis Brand nur sehr wenige statistische Grundlagen heranziehen.

Für die Abschätzung der Initialhäufigkeit für einen Brand werden deshalb die Häufigkeiten für die beiden Ursachen separat abgeschätzt:

- Häufigkeit eines Brandes infolge einer Kollision: Im Rahmen der Unfallanalyse wurden 3 Brandereignisse infolge einer Kollision ermittelt. Dies entspricht einer Brandrate von 0.25 % als Folge einer vorangehenden Kollision. Vergleicht man diesen Wert mit Angaben aus der Literatur, so findet sich in Angaben eines NSTHA-Reports [46] eine Brandrate von 0.3 % infolge von Unfällen. Dementsprechend können für die Abschätzung der Brandrate infolge Kollision die Kollisionsraten mit einem Faktor von 0.003 skaliert werden. Ausgehend von der mittleren Kollisionsrate von $6 \cdot 10^{-7}$ [1/(Fahrzeug * km)] ergibt sich eine Brandrate infolge von Kollisionen von rund $2 \cdot 10^{-9}$ [1/(Fahrzeug * km)].

- Häufigkeit eines Brandes infolge eines technischen Defekts: Auf Basis einer Statistik der Brandereignisse für den Elbtunnel wurde eine Brandrate (alle Ursachen) von rund 10^{-7} [1/(Fahrzeug * km)] ermittelt.¹⁶ Dabei gilt es aber zu beachten, dass ein Großteil dieser Brände lediglich zu kleineren Sachschäden geführt hat und deshalb im Sinne der vorliegenden Fragestellung von untergeordneter Bedeutung ist. Gemäß Angaben im PIARC-Report „Road Safety in Tunnels“ [44] liegt der Anteil der Brände, bei welchen es „weder zu Personen- noch Sachschäden kommt“, bei 80 % bis 90 %. In Anbetracht der Tatsache, dass für die vorliegende Methodik Brände mit einer Brandleistung von mindestens 5 MW (entspricht einem vollständig ausgebrannten Personenwagen) untersucht werden, wird die Annahme getroffen, dass 95 % aller Brandereignisse zu keinen relevanten Schäden führen. Somit resultiert eine Rate relevanter Brände von insgesamt $4.5 \cdot 10^{-9}$ [1/(Fahrzeug * km)]. Unter Berücksichtigung der

¹⁵ Bei den Ereignissen handelt es sich um Brände infolge von Kollisionen. Für Brände infolge von technischen Defekten standen keine Unfallprotokolle zur Auswertung zur Verfügung.

¹⁶ Der Wert wird auch in der PIARC-Studie „Fire and Smoke Control in Road Tunnels“ [43] ausgewiesen.

Brandrate infolge von Kollisionen kann somit eine Rate von rund $3 \cdot 10^{-9}$ [1/(Fahrzeug * km)] für Fahrzeugbrände infolge von technischen Defekten abgeleitet werden.

Für die Abschätzung der Häufigkeit eines Brandes ist somit wie folgt vorzugehen:

1. Abschätzung der Kollisionshäufigkeit (vgl. Kapitel 4.2.3) und Skalierung des resultierenden Wertes mit dem Anteil an Bränden nach Kollisionen (0.3 %),
2. Addition der Brandhäufigkeit infolge technischer Defekte auf Basis der Brandrate von $3 \cdot 10^{-9}$ [1/(Fahrzeug * km)]. Es ist dabei davon auszugehen, dass die Häufigkeit von technischen Defekten proportional zur Tunnellänge und zum Verkehrsaufkommen ist.

Ist aufgrund der spezifischen Gegebenheiten für eine Tunnelröhre von einer abweichenden Brandrate auszugehen, so ist der vorgegebene Wert um einen untersuchungsspezifischen (abgeschätzten) Faktor zu skalieren.

Verzweigung 2: Ereignisort: Portalbereich/ Tunnelinnenstrecke

Im Unterschied zur Kollision wird für das Szenario Brand der Ort des Brandes berücksichtigt, da sich die Portalbereiche (Einfahrt und Ausfahrtbereich) insbesondere hinsichtlich Personenexposition und Fluchtmöglichkeiten und damit auch hinsichtlich des potenziellen Schadensmaßes unterscheiden.

Für die Abschätzung der bedingten Wahrscheinlichkeit eines Brandes in einem der beiden Bereiche sind die jeweiligen Längenanteile an der Gesamtlänge des Tunnels bzw. der Tunnelröhre heranzuziehen. Für die Portalbereiche ist jeweils von einer Länge von 100 m auszugehen.¹⁷

Für eine Tunnelröhre mit einer Gesamtlänge von 1 km liegt die bedingte Wahrscheinlichkeit im Falle eines Brandes bei 20 % ($(2 \cdot 100 \text{ m})/1.000 \text{ m}$), dass sich der Brand im Bereich eines Portals ereignet. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sich der Brand im Tunnelinnenbereich ereignet, liegt entsprechend bei 80 %.

Verzweigung 3: Fließender Verkehr/Stau

Ob sich ein Brand im normalen Verkehr oder bei Stau oder stockendem Verkehr ereignet, hat in erster Linie auf die Zahl der exponierten/gefährdeten Personen und damit auf das potenzielle Schadensmaß einen Einfluss.¹⁸ Die bedingte Wahrscheinlichkeit kann über die Zahl der jährlichen Stautunden abgeschätzt werden (Anteil der Stautunden am Jahr bzw. 8.760 Stunden). Liegt die Zahl der Stautunden für einen Tunnel bzw. eine Tunnelröhre bei jährlich 300 Stunden, so ist für Spalte 3 ein Wert von 3.5 % (Stautunden/Jahrestunden) bzw. 96.5 % einzusetzen.

Verzweigung 4: Wirkung Branddetektion/Brandlüftung

Im Falle eines Brandes ist es von maßgeblicher Bedeutung, dass der Brand möglichst rasch detektiert wird und die Tunnellüftung mit dem Brandprogramm startet. Über mögliche Betriebsstörungen und daraus ableitbare Ausfallwahrscheinlichkeiten dieser Systeme liegen (wie auch zu vielen anderen Tunnelinfrastrukturanlagen) praktisch keine Grundlagendaten und Erhebungen vor.¹⁹ Neben den fehlenden Grundlagendaten weisen die heute in Tunneln installierten Anlagen eine beträchtliche Heterogenität hinsichtlich Art der Ausgestaltung und der Auslegung der Detektions- und Lüftungsanlagen auf. So hängt beispielsweise auch die Wahrscheinlichkeit der Detektion eines Brandes stark vom jeweiligen System der Detektionsanlage (Sichttrübmessanlage, linienförmige Brandmelder etc.) bzw. von der resultierenden Wirkung verschiedener in einem Tunnel installierter Detektionssysteme ab.

Aus diesem Grund wird empfohlen, die entsprechenden Ausfallwahrscheinlichkeiten mittels einfa-

¹⁷ Gemäß der Unfallanalyse und vergleichbaren statistischen Auswertungen weisen die Portalbereiche eine gegenüber der Tunnelinnenstrecke i. Allg. erhöhte Unfallrate aus. Aufgrund der Tatsache, dass die überwiegende Zahl der Brände jedoch infolge von technischen Defekten entsteht (und diese weitgehend als ortsunabhängig angenommen werden können), wird dieser Aspekt in der Methodik nicht weiter vertieft.

¹⁸ Auch das Potenzial für Sachschäden infolge eines Brandes ist entsprechend bei Stausituationen größer.

¹⁹ Eine Auswertung im Rahmen des Forschungsprojektes hat ergeben, dass normalerweise nur Angaben der Hersteller von Tunnelinfrastrukturanlagen vorliegen, die jedoch meist auch nur auf Schätzungen beruhen. Eine systematische Erfassung und Auswertung von Betriebsstörungen bestehender Tunnel wurde, in den Erhebungen nicht gefunden. Teilweise liegen Informationen zu Einzelereignissen vor, welche aber noch keine statistische Auswertung zulassen.

cher Fehlerbäume abzuschätzen.²⁰ Eine exemplarische Abbildung eines solchen Fehlerbaumes zeigt Bild 11. Für eine erste Abschätzung kann als pragmatische Annahme von einem Ausfall oder einer ungenügenden Funktion der Anlagen von 1 % aller Brandfälle ausgegangen werden.

Verzweigung 5: Brandlast: 5 MW/30 MW/ 50 MW/100 MW

Die Brandlast/Brandleistung bestimmt maßgeblich das resultierende Schadenausmaß. Während die Personenschäden primär durch die Wirkung der entstehenden Rauchgase bestimmt werden, werden die Sachschäden durch die Hitzewirkung hervorgerufen.

Die resultierende Brandlast hängt primär vom Brandgut (Art der Fahrzeuge, Ladung etc.) ab und kann je nach spezifischer Situation variieren. Um das Spektrum der Brandlasten abbilden zu können, werden vier Fälle unterschieden.

Auf Basis der Unfallanalyse lassen sich keine statistischen Auswertungen zur Verteilung der un-

terschiedenen Brandleistungen vornehmen. Auch in der Literatur finden sich nur spärliche Angaben. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass Brände mit großen Brandleistungen (50 MW bzw. 100 MW) überwiegend infolge von Kollision und nur selten infolge von technischen Defekten auftreten. Es ist zudem davon auszugehen, dass kleinere Brände das Spektrum der Brandlasten deutlich dominieren. Es wird deshalb im Sinne einer Annahme vorausgesetzt, dass höchstens jeder zehnte Brand eine Brandlast von 5 MW überschreitet.

Als vereinfachende Annahmen wird folgende Verteilung zugrunde gelegt:

- Brandleistung von 5 [MW]: 90.00 %,
- Brandleistung von 30 [MW]: 9.90 %,
- Brandleistung von 50 [MW]: 0.09 %,
- Brandleistung von 100 [MW]: 0.01 %.

Weist ein Tunnel einen vom Durchschnitt stark abweichenden Schwerverkehrsanteil auf, so ist in begründeten Fällen eine Anpassung der Abschätzungen zu prüfen.

²⁰ Es gilt aber festzuhalten, dass auch hierbei verschiedene Annahmen zu treffen sind, da nicht alle Grundlagendaten vorliegen werden.

²¹ Für Kollisionen können statistische Grundlagendaten herangezogen werden, für Brände über 5 MW fehlen diese Angaben aufgrund der nur geringen Anzahl solcher Ereignisse weitgehend.

Verzweigung 6: Verteilung Schadenausmaß

Im Gegensatz zur Kollision sind hinsichtlich der Verteilung des Schadenausmaßes auf Basis der Statistik keine zuverlässigen Aussagen möglich.²¹

Für die Ermittlung der Höhe des Schadenausmaßes stehen aber Simulationsmodelle zur Verfü-

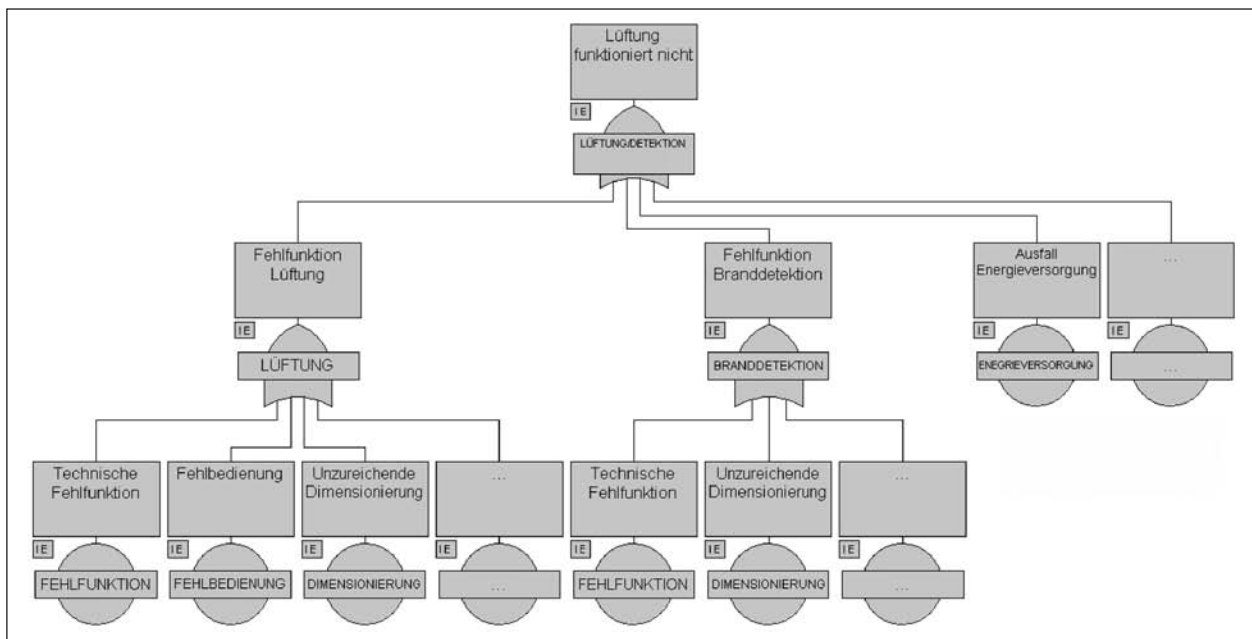


Bild 11: Ausschnitt eines exemplarischen Fehlerbaums zur Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Lüftung/Branddetektion

gung (vgl. auch Spalte 8, Modellwerte Schadenausmaß). Um die Unschärfen in den Modellen und situationsspezifischen Zufälligkeiten abbilden zu können, wird jeweils von einer festgelegten Verteilung der mittels Modellen ermittelten Schadenausmaße ausgegangen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei kleineren Bränden der Anteil mit keinen oder nur geringen Personen- und Sachschäden größer ist als bei Großbränden, werden separate Annahmen zur Verteilung in Abhängigkeit der Brandlast getroffen. Die Angaben zur Verteilung für die Schadenausmaßermittlung sind in Tabelle 9 mit den zusätzlichen relevanten Einflussgrößen aufgeführt.

Die Verteilung der jeweiligen Schadenausmaße kann durch organisatorische und/oder technische bzw. bauliche Maßnahmen beeinflusst werden. Beispiele hierzu sind:

- Organisatorische Maßnahmen:
 - Ereignisdienste und Rettungskräfte (örtliche Stationierung,²² technische und personelle Mittel, Ausbildungsgrad etc.),

- Information der Verkehrsteilnehmer im Ereignisfall: Werden im Brandfall die Verkehrsteilnehmer rasch und erfolgreich durch effiziente Maßnahmen zur Flucht aufgefordert, so reduziert sich das Schadenausmaß entsprechend.

- Technische/bauliche Maßnahmen: SOS-Nischen mit Feuerlöschern, Löscheinrichtungen etc.

Verzweigung 7: Gewichtungsfaktor Modellwert

Um die unter Verzweigung 6 erwähnte Verteilung der Schadenausmaße und die mittels Modellen (Rauchgasausbreitungsmodelle, Fluchtsimulationsmodelle usw.) ermittelten Basiswerte abzubilden, werden die Modellwerte entsprechend gewichtet bzw. skaliert. Die Skalierungsfaktoren für die Modellwerte sowie der zugehörige relative Anteil sind aus den Tabellen 9 und 10 ersichtlich (die Werte entsprechen Annahmen).

Verzweigung 8: Modellwert Schadenausmaß

Schadenindikator Todesopfer

Im Falle eines Brandereignisses können Tunnelnutzer auf ihrer Flucht durch den Einfluss von Rauch und Temperatur behindert werden. Seine schädigende Wirkung entfaltet der Rauch einerseits durch

²² Aus Blickwinkel der Risikoanalyse ist primär die Zeitspanne zwischen dem Brandausbruch bis zur Intervention entscheidend. Dementsprechend ist die örtliche Stationierung nur ein relevanter Aspekt. Andere Faktoren wie beispielsweise Alarmerungszeit, Zufahrtsmöglichkeiten etc. spielen hier ebenfalls eine wichtige Rolle.

Skalierungsfaktor	Brandlast 5 MW	Brandlast 30 MW	Brandlast 50 MW	Brandlast 100 MW
0 * Modellwert	97.00 %	80.00 %	20.00 %	5.00 %
0.1 * Modellwert	0.50 %	5.00 %	10.00 %	10.00 %
0.5 * Modellwert	0.50 %	6.00 %	20.00 %	30.00 %
1 * Modellwert	1.90 %	8.00 %	45.00 %	50.00 %
2 * Modellwert	0.09 %	0.90 %	4.00 %	4.00 %
5 * Modellwert	0.01 %	0.10 %	1.00 %	1.00 %

Tab. 9: Annahmen zur Verteilung der Schadenausmaße in Abhängigkeit der mittels Modellen ermittelten Werte (Situation Lüftung funktioniert)

Skalierungsfaktor	Brandlast 5 MW	Brandlast 30 MW	Brandlast 50 MW	Brandlast 100 MW
0 * Modellwert	95.00 %	65.00 %	20.00 %	5.00 %
0.1 * Modellwert	0.50 %	8.00 %	10.00 %	10.00 %
0.5 * Modellwert	0.50 %	10.00 %	20.00 %	30.00 %
1 * Modellwert	4.00 %	15.00 %	45.00 %	50.00 %
2 * Modellwert	0.09 %	1.90 %	4.00 %	4.00 %
5 * Modellwert	0.01 %	0.10 %	1.00 %	1.00 %

Tab. 10: Annahmen zur Verteilung der Schadenausmaße in Abhängigkeit der mittels Modellen ermittelten Werte (Situation keine Lüftung)

die bei einem Brand frei werdenden Rußpartikel und andererseits durch die bei einer Verbrennung entstehenden Rauchgase. Rußpartikel führen bereits bei geringen Konzentrationen zu einer erheblichen Reduzierung der Sicht und Orientierung und bewirken starke Irritationen der Atemwege und Schleimhäute. Rauchgase wie Kohlenmonoxid und Blausäure entfalten ihre Toxizität in Abhängigkeit von Konzentration und Expositionsdauer. Der Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus ist neben der Höhe ebenfalls abhängig von der Expositionsdauer. Alle drei Komponenten, Rußpartikel, Rauchgaskonzentration sowie Temperatur, können sowohl einzeln als auch in Kombination zur Fluchtaufgabe führen. Analysen von Brandereignissen zeigen jedoch, dass primär der Einfluss durch Rauch zur Fluchtaufgabe führt.

Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit

Aus empirischen Untersuchungen zum Fluchtverhalten unter dem Einfluss von Rauch kann abgeleitet werden, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der lokal vorhandenen Sichtweite [45]. Wie aus Bild 12 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i. d. R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt wer-

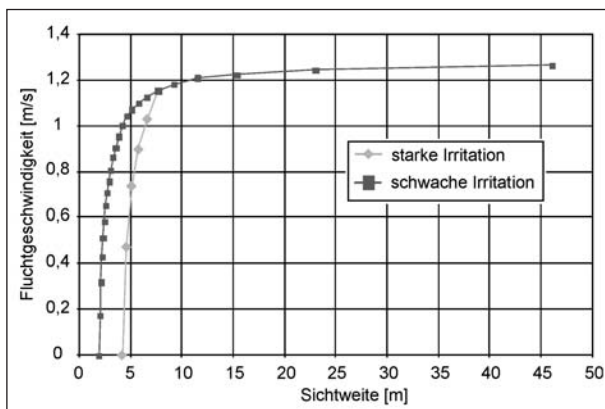


Bild 12: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte, gemäß MAYER [45]

den bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.

Toxizität von Brandgasen

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

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

Blausäure weist gegenüber Kohlenmonoxid eine ca. zehnmal höhere Toxizität auf (vgl. Bild 13). Es entsteht bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Materialien. Hierzu zählen beispielsweise Acryl, Nylon, Polyurethan und Wolle. Das Blausäuregas ist im Gegensatz zum Kohlenmonoxid leicht wasserlöslich und kann daher durch den menschlichen Organismus sowohl oral als auch durch Inhalation aufgenommen werden. Untersuchungen zeigen, dass bereits Konzentrationen von 180 bis 270 ppm in der Atemluft bei kurzzeitiger Exposition und Konzentrationen von 90 ppm bei längerer Exposition zum Tode führen.

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

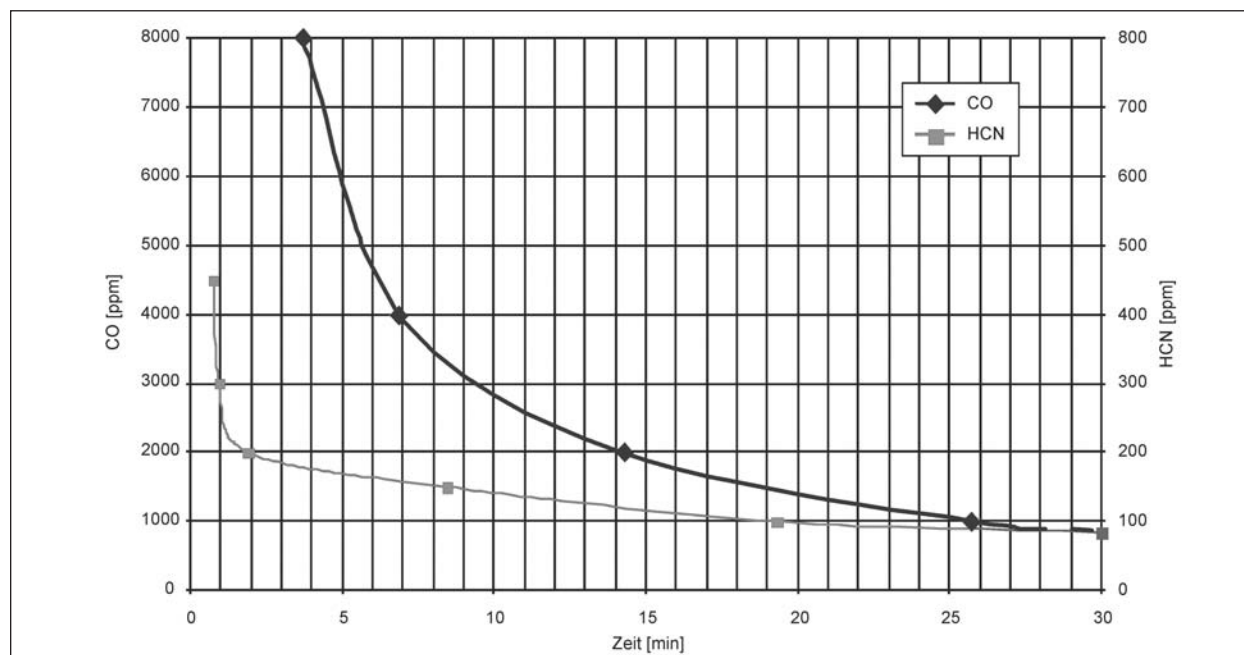


Bild 13: Eintretende Bewusstlosigkeit in Abhängigkeit von der Zeit und der Konzentration, gemäß MAYER [45]

In Bild 13 sind die Konzentrationen für Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) in Abhängigkeit von der Expositionsdauer aufgetragen, ab denen mit Bewusstlosigkeit zu rechnen ist.

Einfluss von Temperatur auf den menschlichen Organismus

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

Neben der Umgebungstemperatur hat der Feuchtegehalt der Luft einen wesentlichen Einfluss auf die Art der Schädigung. In Bild 14 sind experimentell ermittelte Grenztemperaturkurven von CRANE (1978) und PURSER (1995) in Abhängigkeit der

Expositionsdauer dargestellt. Bei Temperaturen bis 120 °C ist nach PURSER (1995) in trockener Luft mit überwiegender Wärmestaubbildung zu rechnen. Temperaturen über 120 °C führen schließlich zu Verbrennungen der Haut.

Modellanforderungen

Die Bestimmung personenbezogener Schadenausmaße erfordert in Raum und Zeit aufgelöste Konzentrations- und Temperaturverteilungen. Hierzu müssen die zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung in den drei Raumdimensionen gelöst werden. Dies erfordert den Einsatz numerischer Methoden, da diese Gleichungen aufgrund ihrer Komplexität nicht mehr analytisch lösbar sind. Hierzu existieren sog. CFD-Modelle (wie beispielsweise der Fire Dynamic Simulator, FDS), deren prinzipielle Eignung zur Berechnung der geforderten Größen bereits im Rahmen des Forschungsprojekts „Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung“ (FE 03.375/2004/FGB) nachgewiesen wurde. Mit Hilfe dieser CFD-Modelle lassen sich Tunnel unter Berücksichtigung der interessierenden Einflüsse durch Geometrie, Lüftung, Verkehr, Meteorologie etc. sehr feinskalig abbilden. Die Anwendung von CFD-Modellen erfordert jedoch einen erhöhten Rechen- und Zeitaufwand. Üblicherweise erfolgt die Berechnung ganzer Tunnelanlagen daher auf Rechenclustern bzw. Großrechnern.

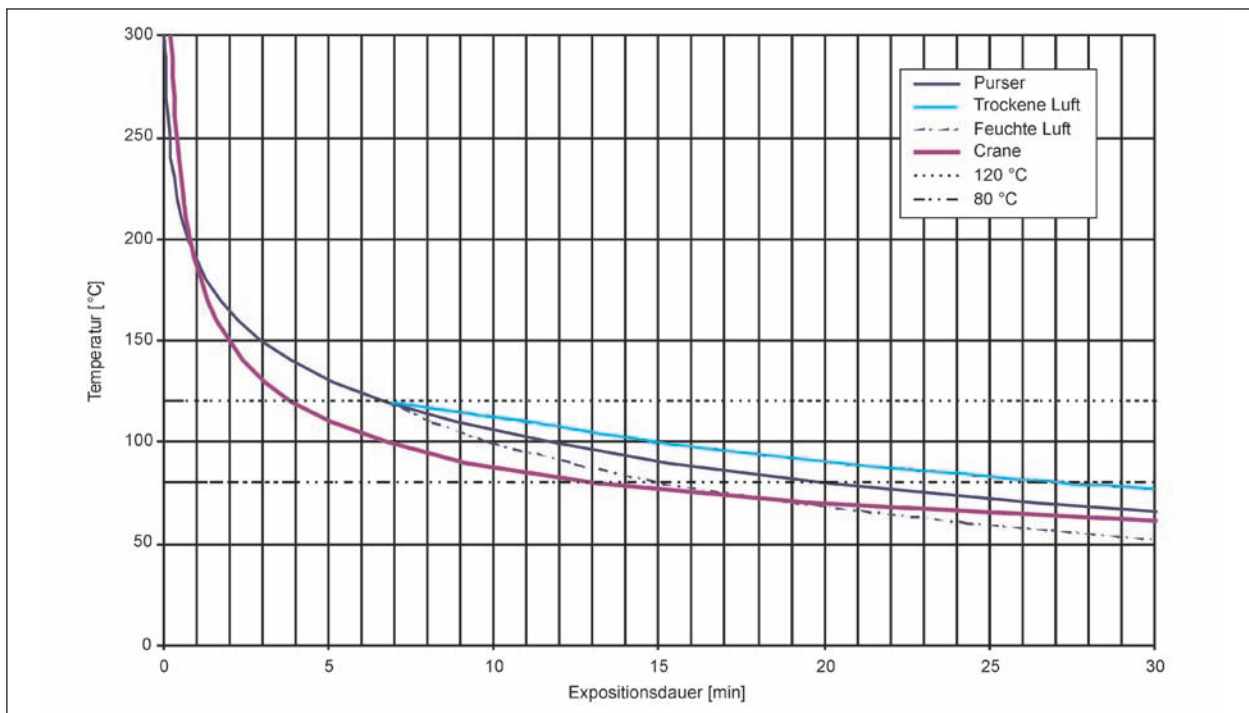


Bild 14: Beeinträchtigung des menschlichen Organismus in Abhängigkeit von der Expositionszeit und Umgebungstemperatur, gemäß MAYER [45]

Neben den CFD-Modellen existieren auch einfachere (ein- oder zweidimensionale) Modelle, welche einen geringeren Modellierungsaufwand erfordern, jedoch hinsichtlich der räumlichen Auflösung der Ergebnisse weniger genau sind. Wie die Erfahrung zeigt, ist je nach Fragestellung zu prüfen, welche Modelle für eine spezifische Untersuchung geeignet sind. So kann beispielsweise bei sehr langen Tunneln die Anwendung von CFD-Modellen zu aufwändig für eine praktische Umsetzung werden. Andererseits können mit einfacheren Modellen komplizierte Einflussgrößen wie beispielsweise die detaillierte Tunnelgeometrie, komplexe Lüftungssysteme oder Meteorologie oftmals nur grob oder gar ungenügend abgebildet werden.

Schadenausmaßermittlung mittels Selbstrettungsbereichen

Um im Brandfall den Einflüssen aus Temperatur und Rauch zu entgehen, müssen sich Tunnelnutzer selbstständig in sichere Bereiche retten. Das erfolgreiche Flüchten in sichere Bereiche wird maßgeblich von den lokal vorherrschenden Sichtbedingungen bestimmt. Als Maß zur Abschätzung der Fluchtbedingungen wird daher der Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit benutzt. Mit Hilfe konzentrationsabhängiger Sichtweitenberechnungen lassen sich in Abhängigkeit von

der Fluchtgeschwindigkeit und den gegebenen Fluchtweglängen Bereiche ableiten, aus denen eine Selbstrettung unter den jeweiligen Randbedingungen noch möglich ist. Prinzipiell ist bei der Bestimmung von Selbstrettungsbereichen zwischen sicheren und unsicheren Bereichen zu unterscheiden.

Als wenig kritische Bereiche gelten Tunnelabschnitte, in denen die Sichtweite über den gesamten Brandverlauf mindestens dem Abstand der Fluchtwegkennzeichnung nach RABT 2006 von 25 m entspricht und somit die Selbstrettungsmöglichkeiten zu keinem Zeitpunkt durch Verrauchung eingeschränkt werden. Außerdem wird davon ausgegangen, dass in wenig kritischen Bereichen die Raucheinwirkung gering und damit eine erfolgreiche Selbstrettung nicht unbedingt für das Überleben notwendig ist.

Für unsichere Bereiche des Tunnels wird zwischen Bereichen, aus denen eine erfolgreiche Selbstrettung möglich, und Bereichen, aus denen nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung möglich ist, unterschieden. Bei Sichtweiten größer als 5 Meter wird eine Fluchtgeschwindigkeit von bis zu 1.3 m/s angenommen. Fällt die Sichtweite unter 5 Meter, so wird davon ausgegangen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

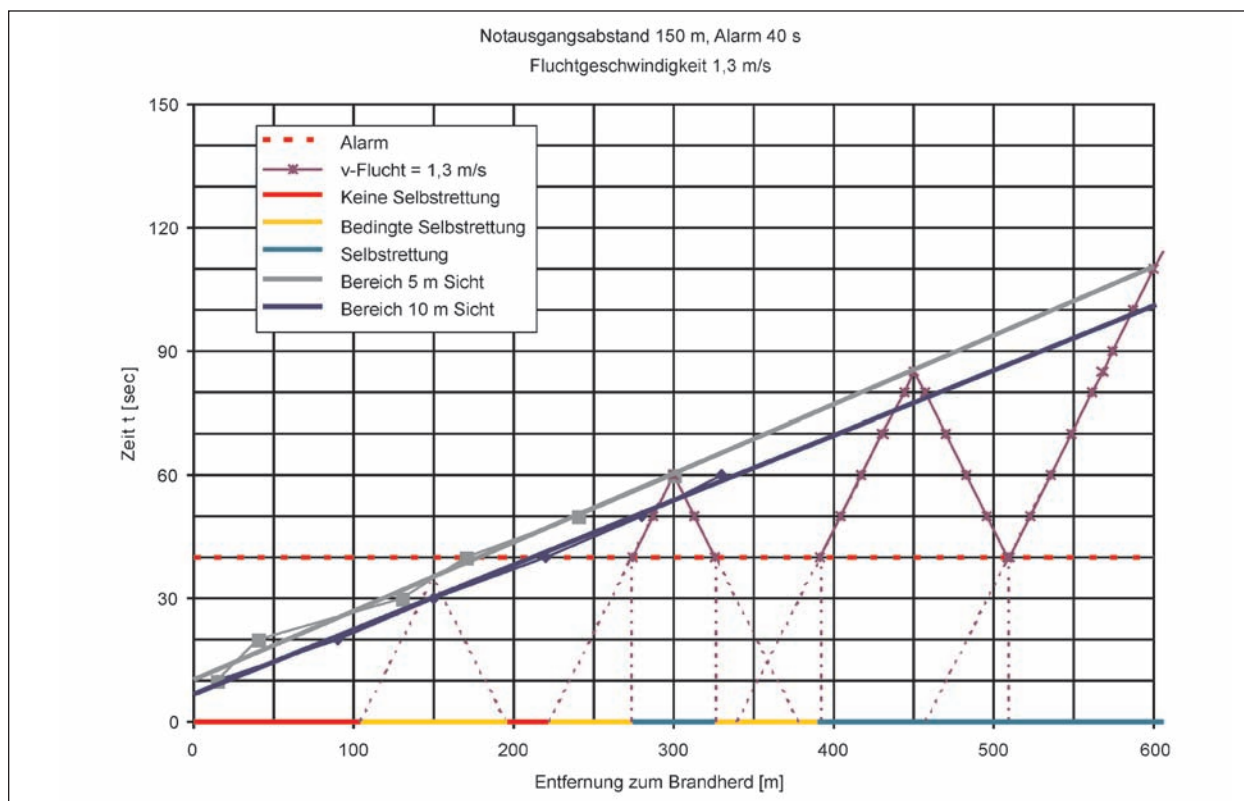


Bild 15: Selbstrettungsbereiche bei einem Notausgangsabstand von 150 m, Alarmierung der Tunnelnutzer 40 s nach Brandausbruch, gemäß MAYER [45]

Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung ergeben sich aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung bezeichnet. Keine Selbstrettung ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann [45]. In Bild 15 sind exemplarisch die sich ergebenden Selbstrettungsbereiche bei einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 6.0 m/s und einem Notausgangsabstand von 150 m dargestellt.

Schadenindikator Sachschäden und Verletzte

Zur Abschätzung der Sachschäden und der Personenschäden in Form von Verletzten wird folgendes pragmatisches Vorgehen vorgeschlagen:

- Die Abschätzung der Zahl der Verletzten kann vereinfachend auf Basis des Ausmaßwertes für

den Schadenindikator Todesopfer abgeleitet werden. Dazu kann die Annahme getroffen werden, dass pro Todesopfer infolge eines Brandes zehn weitere Personen Verletzungen erleiden. Es wird ferner angenommen, dass 10 % der Betroffenen schwere Verletzungen erleiden bzw. 90 % leichte Verletzungen. Zur Quantifizierung der Schäden in monetären Einheiten werden die analogen Unfallkosten herangezogen, welche bei den Auswertungen für den Szenariotyp Kollision veranschlagt wurden: Für Schwerverletzte werden Kostenfolgen von € 87.000, für Leichtverletzte € 3.750 veranschlagt.

- Die Abschätzung der Sachschäden kann bei der Anwendung entsprechender Brandsimulationsmodelle über die Verteilung der Temperaturen und die projektspezifisch jeweils betroffene Tunnelinfrastruktur vorgenommen werden. Im Sinne einer Richtgröße kann bei fehlenden Grundlagen die pragmatische Annahme getroffen werden, dass die Sachschäden um etwa einen Faktor 2 bis 3 größer sind als die Kosten für Verletzte (gemäß den veranschlagten Kostenfolgen).

Verzweigung 9: Häufigkeit pro Jahr

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

Verzweigung 10: Erwartetes Schadenausmaß

Das erwartete Schadenausmaß wird ermittelt, indem für jedes Teilszenario der Modellwert (Verzweigungspunkt 8) mit dem jeweiligen Gewichtungsfaktor (Verzweigungspunkt 7) multipliziert wird.

Verzweigung 11: Aversionsfaktor

Analog zum Szenariotyp Kollision wird auch für Brandereignisse eine Risikoaversionsfunktion berücksichtigt: Es wird für Personenschäden von folgendem Aversionsfaktor φ in Abhängigkeit des effektiven Schadenausmaßes ausgegangen:

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

Für Sachschäden wird der Aversionsfaktor φ wie in Tabelle 11 dargestellt bestimmt.

Schadenausmaß Sachschäden	Risiko-Aversionsfaktor φ
< € 5 Mio. pro Ereignis	1
≥ € 5 Mio. pro Ereignis	3

Tab. 11: Risikoaversionsfaktoren für Sachschäden infolge Brand

Verzweigung 12: Bewertetes Risiko R_e

Das bewertete kollektive Risiko R_e wird analog zum Vorgehen für den Szenariotyp Kollision bestimmt (vgl. Kapitel 4.2.3).

Verzweigung 13: Grenzkosten

Für den Szenariotyp Brand ist von folgenden Grenzkosten auszugehen:

- € 10 Mio. pro gerettetem Menschenleben,²³
- € 3.- pro € 1.- verhindertem Sachschaden.

Weitergehende Erläuterungen zum Aspekt der Grenzkosten finden sich in Anhang 8.

Verzweigung 14: Monetarisiertes Risiko R_m

Das monetarisierte Risiko R_m für ein Teilszenario im Ereignisbaum wird bestimmt, indem das bewertete Risiko R_e mit den Grenzkosten multipliziert wird. Das Vorgehen ist analog zum Szenariotyp Kollision.

4.4 Risikoberechnung und -darstellung

Auf der Grundlage des beschriebenen Vorgehens können die Risiken für die Szenariotypen „Brand (ohne Kollision)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ für einen Tunnel bzw. eine Tunnelröhre ermittelt werden. Das Risiko wird wie folgt ausgewiesen:

- Risikokenngrößen:
 - Kollektives Risiko Todesopfer: Für den Schadenindikator Todesopfer ist das kollektive Risiko bzw. der Schadenerwartungswert pro Jahr für den untersuchten Tunnel zu bestimmen. Besteht ein Tunnel aus mehreren Tunnelröhren, so sind die entsprechenden Werte pro Tunnelröhre zu addieren.
 - Monetarisiertes Risiko R_m : Für den Schadenindikator Todesopfer sowie für den Schadenindikator Sachschäden und Verletzte ist das monetarisierte Risiko R_m für den untersuchten Tunnel zu bestimmen. Der ermittelte Wert entspricht dem bewerteten monetären Schadenerwartungswert pro Jahr. Besteht ein Tunnel aus mehreren Tunnelröhren, so sind die entsprechenden Werte pro Tunnelröhre zu addieren.
 - Information der Verkehrsteilnehmer im Brandfall: Werden im Brandfall die Verkehrsteilnehmer rasch und erfolgreich durch effiziente Maßnahmen zur Flucht aufgefordert, so reduziert sich das Schadenausmaß entsprechend.

²³ Die unterschiedlichen Grenzkosten pro gerettetem Menschenleben für die Szenariotypen „Kollision“ und „Brand“ ergeben sich durch die unterschiedliche Einstufung hinsichtlich der Risikokategorien (Kollision: Einstufung Risikokategorie 2; Brand: Einstufung Risikokategorie 3). Weitergehende Angaben hierzu finden sich in Anhang 8.

- Summenkurve im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm: Für den Schadenindikator Todesopfer ist für den untersuchten Tunnel die Summenkurve für die beiden Szenariotypen auszuweisen (vgl. Bild 5).

4.5 Risikobewertung und Maßnahmenplanung

Die ermittelten Risiken werden zum einen als Risikokenngröße oder in Form von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ausgewiesen. 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 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, welche möglichst objektiv durchgeführt werden muss, enthält die Risikobewertung definitionsgemäß Wertungen. Sie kann somit nicht eine Domäne von Fachleuten alleine 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 aufwändige 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.

Grundsätzlich wird zur Risikobewertung ein Vorgehen vorgeschlagen, das sich an der heute in verschiedenen Ländern gängigen Praxis zur Bewer-

tung von Risiken orientiert: Es wird ein maximal akzeptables Risiko festgelegt, welches unabhängig von den für Sicherheitsmaßnahmen resultierenden Kostenfolgen nicht überschritten werden darf. Diese Grenze wird dabei erfahrungsgemäß aufgrund der zu erwartenden Risiken so festgelegt, dass die „kritischsten“ Fälle identifiziert und entsprechende risikomindernde Maßnahmen geplant werden. In den übrigen Fällen wird nach dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit (Kosten-Wirksamkeit) die Planung von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen vorgenommen.

4.5.1 Bewertung mittels Summenkurven im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm

Um die in den Richtlinien RABT 2006 bzw. 2004/54/EG genannte Forderung hinsichtlich Risikobewertung von Tunneln mit „besonderer Charakteristik“ berücksichtigen zu können und um sicherzustellen, dass ein einheitliches Sicherheitsniveau eingehalten werden kann, wird ein absolutes Bewertungskriterium in Form von Akzeptabilitätsbereichen im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm vorgeschlagen.

Die in den Richtlinien geforderten Sicherheitsmaßnahmen dienen in erster Linie der Minderung von Personenrisiken. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm ausschließlich für den Schadenindikator Todesopfer.

Für die Bewertung der Risiken mittels Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms soll wie folgt vorgegangen werden:

1. Für den zu untersuchenden Tunnel werden für die beiden zu untersuchenden Ereignistypen „Kollision (ohne Brand)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ anhand der Ereignisbäume die Häufigkeit und Schadenausmaße für die jeweiligen Teilszenarien für den Schadenindikator Personenschäden ermittelt. Zur Schaffung einer einheitlichen Bezugsgröße werden die Häufigkeiten auf eine Streckenlänge von 1 km und ein Jahr normiert. Die Berücksichtigung der Risikoaversion erfolgt im Gegensatz zum Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis nicht über den rechnerischen Einbezug eines Aversionsfaktors, sondern wird implizit mit der Steigung der Akzeptabilitätslinie festgelegt.
2. Für den zu untersuchenden Tunnel wird die resultierende Summenkurve (resultierend aus den jeweiligen Szenarien für die zum Tunnel

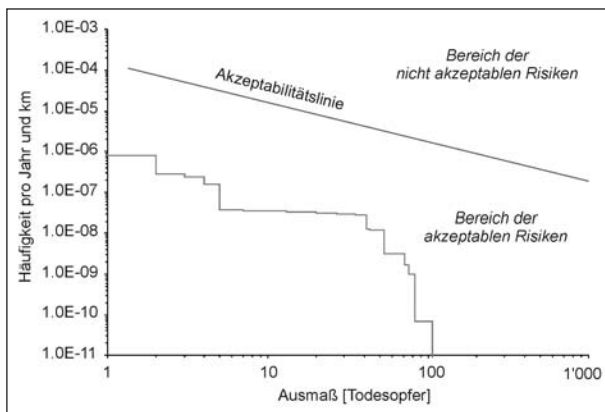


Bild 16: Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptabilitätsbereichen (exemplarische Darstellung)

gehörenden Tunnelröhren), normiert auf eine Bezugslänge von 1 km ermittelt und im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm dargestellt, wie dies Bild 16 exemplarisch illustriert.

- Liegt die ermittelte normierte Summenkurve im Bereich der nicht tragbaren Risiken, so sind zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen. Für den zu untersuchenden Tunnel ist dann die Summenkurve unter Berücksichtigung von etwaigen zusätzlichen/alternativen Maßnahmen erneut zu bestimmen und aufgrund der relativen Lage zur Akzeptabilitätslinie zu bewerten. Liegt die neu ermittelte Summenkurve immer noch im nicht akzeptablen Bereich des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms, so sind weitere Maßnahmen zu untersuchen bzw. zu realisieren.

Im Prinzip wird mit der Festlegung der Akzeptabilitätslinie im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm implizit auch eine Grenze für das maximal zulässige kollektive Risiko festgelegt. Darüber hinaus werden mit der Wahl der Lage und Steigung der Akzeptabilitätslinie auch der zulässige Verlauf der Summenkurve und damit die Charakteristik der als akzeptabel bewerteten Risiken festgelegt.

Ziel der Festlegung der Akzeptabilitätslinie ist es, ein einheitliches minimales Sicherheitsniveau zu definieren. Die Festlegung der Akzeptabilitätslinie soll dabei unter Berücksichtigung der praktischen Umsetzbarkeit (Machbarkeit) vorgenommen werden. Während für die Beurteilung mittels Grenzkosten bzw. Kosten-Wirksamkeit teilweise objektivierbare Größen (direkte und indirekte Kostenfolgen, welche durch den Tod einer Person entstehen) herangezogen werden können, beruht die Festlegung der Akzeptabilitätslinie im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm weitgehend auf einem subjektiven Konsensverfahren.

Aufgrund der im Rahmen des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnisse lässt sich momentan noch kein konkreter Vorschlag für die Lage der Akzeptabilitätslinie festlegen.²⁴ Als Basis für einen solchen Vorschlag ist zu prüfen, welches Sicherheitsniveau verschiedene richtlinienkonforme Tunnel aufweisen. Darauf aufbauend kann ein entsprechender Vorschlag für Art, Lage und Verlauf einer Akzeptabilitätslinie ausgearbeitet werden. Bis dahin ist für die Risikobewertung ein relativer Vergleich auf Basis der monetarisierten Risiken R_m [€/Jahr] zwischen dem Planfall (Abweichungen von der Richtlinie bzw. besondere Charakteristik) und dem entsprechenden Wert für den theoretischen Fall einer richtlinienkonformen Ausgestaltung vorzunehmen.²⁵

4.5.2 Bewertung von Maßnahmen mittels Kosten-Wirksamkeit

Im Grundsatz gilt, dass die Forderungen der Richtlinien RABT 2006 bzw. 2004/54/EG einzuhalten sind. Können die normativen Anforderungen für einen Tunnel gemäß den Richtlinien nicht umgesetzt werden, sind entsprechende alternative Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen. Dabei soll wie folgt vorgegangen werden:

- Für die alternativ geplanten Maßnahmen sind sowohl ihre risikomindernde Wirkung als auch die mit der Realisierung und dem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Für die Beurteilung einer vorgesehenen Alternativ-Maßnahme nach deren Kosten-Wirksamkeit müssen die so genannten Jahreskosten K_{Jahr} ermittelt werden. Diese setzen sich zusammen aus:

- Investitionskosten (K_{Invest}),

²⁴ Die Steigung der Akzeptabilitätslinie kann auf die gewählte Aversionsfunktion abgestützt werden.

²⁵ Es zeichnet sich ab, dass einzelne EU-Staaten bei der Entwicklung der Methodik die Risikobewertung auf Basis eines Vergleichs der kollektiven Risiken für den Indikator Todesopfer vornehmen werden. Für die vorliegende Methodik wird jedoch empfohlen, den Vergleich auf Basis der monetarisierten kollektiven Risiken vorzunehmen. Grund dafür ist die Tatsache, dass in dieser Risikokenngröße auch die Aversionsfunktion mitberücksichtigt wird und damit grob auch die Charakteristik bzw. der Verlauf der Summenkurve besser abgebildet werden kann als über das kollektive Risiko. Zudem kann diese Messgröße direkt auch für die Maßnahmenbewertung auf Basis der Kosten-Wirksamkeit herangezogen werden.

- Betriebs- und Instandhaltungskosten pro Jahr (K_{Betrieb})

Die resultierenden jährlichen Kosten können wie folgt berechnet werden:

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

dabei bedeuten:

K_{Jahr} : Jahreskosten [€/Jahr]

K_{Invest} : Investitionskosten [€/km]

K_{Betrieb} : Betriebs-/Instandhaltungskosten [€/Jahr]

n : Lebensdauer [Jahre]

d : Diskontrate/Annuitätenfaktor [%] (typischerweise im Bereich von 2 %)

Analog zur Bestimmung der Risiken bzw. zur Risikominderung sind die Maßnahmenkosten auf ein Jahr umzurechnen.

Die Maßnahmenkosten sind jeweils projektspezifisch zu ermitteln. Als Basis für eine grobe Abschätzung können die Richtkosten in Anlehnung an die in Anhang 9 aufgelisteten Richtkosten abgeschätzt werden.

Die Beziehung zwischen Maßnahmen, deren Kosten und der Risikominderung lässt sich in einem Diagramm mit den beiden Achsen „Risiko“ und „Kosten“ aufzeigen, wie aus Bild 17 ersichtlich ist.

Jede Sicherheitsmaßnahme bzw. deren Kostenfolgen und ihre risikomindernde Wirkung lässt sich als Punkt im Diagramm in Bild 17 darstellen.

- Die Maßnahmen werden anhand des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses beurteilt. Sowohl die Kosten (K_{Jahr} bzw. ΔK) als auch die Wirkung (R_m bzw. ΔR) beziehen sich auf ein Jahr und sind als monetäre Einheit [€] ausgedrückt:

$$\text{Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis} = \frac{K_{\text{Jahr}}}{R_m} = \frac{\Delta K}{\Delta R}$$

Ist das Verhältnis kleiner als 1, so handelt es sich um eine kostenwirksame bzw. verhältnismäßige Maßnahme, d. h. die risikomindernde Wirkung ist größer als die Kosten.

Da die Abschätzung der Kosten und der Risikoreduktion eine gewisse Unschärfe aufweist, werden für die Beurteilung auf Basis des Kos-

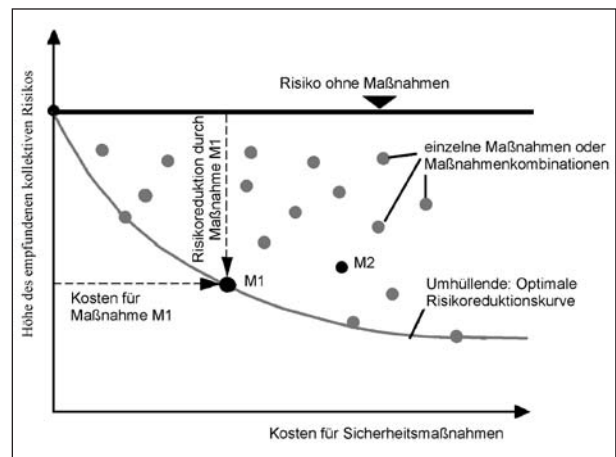


Bild 17: Risikominderung und Kosten für zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen

ten-Wirksamkeits-Verhältnisses folgende Kriterien festgelegt:

- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 1 :
→ Maßnahmen sind zu realisieren,
- $1 \leq$ Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 2 :
→ Realisierung Maßnahmen fallweise prüfen,
- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ≥ 2 :
→ Realisierung nicht kostenwirksam.

5 Fallbeispiel

Die vorliegende Methodik wurde anhand von fünf Fallbeispielen angewendet. In diesem Kapitel ist die exemplarische Anwendung der Methodik an einem Fallbeispiel illustrierend erläutert. Die Ergebnisse der anderen Fallbeispiele sind in Anhang 10 zusammengefasst.

5.1 Angaben zum Tunnel

Tabelle 12 zeigt die wichtigsten Angaben, welche den untersuchten Tunnel charakterisieren.

5.2 Szenariotyp Kollision (ohne Brand)

In Tabelle 13 sind die wichtigsten Einflussgrößen zur Ermittlung der Ereignishäufigkeiten und Schadensausmaße für den Szenariotyp Kollision zusammengefasst.

In Bild 18 ist exemplarisch der Ereignisbaum für Personenschäden (Schadenindikator Todesopfer) dargestellt.

Tunnelparameter	Röhre 1	Röhre 2
Verkehrart	Richtungsverkehr, absteigend	Richtungsverkehr, aufsteigend
Anz. Fahrstreifen pro Richtung	3	2
Fahrstreifenbreite	3.75 m	3.75 m
Seitenstreifen	-	-
Lichte Breite	14.6 m	11.2 m
Lichte Höhe	8.2 m	6.7 m
Länge	704 m	704 m
Min. Längsneigung	3.0 %	-3.0 %
Max. Längsneigung	3.0 %	-3.0 %
Zulässige Geschwindigkeit	100 km/h	100 km/h
Lüftungssystem	Längslüftung	
Notausgänge/ Fluchtwege	1 Notausgang in Tunnelmitte	
DTV	38.800 Kfz/d	
Schwerverkehrsanteil	16.4 %	
Stautunden	250 Stunden/Jahr	

Tab. 12: Charakteristik des untersuchten Fallbeispiel-Tunnels

Verzweigung Ereignisbaum	Bemerkungen
[1] Initialereignis Kollision	Unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens von 38.800 Fahrzeugen pro Tag bzw. 19.400 pro Tag und Tunnelröhre kann eine statistische Unfallhäufigkeit von insgesamt 1.13 Unfällen pro Jahr für eine Tunnelröhre bzw. 2.26 für den gesamten Tunnel abgeschätzt werden
[2] Unfalltyp	Tunnel ohne Zu-/Abfahrt, Längsklasse 600 m-1.200 m Unfalltyp 1: 24.4 % Unfalltyp 3: 0.0 % Unfalltyp 6: 56.1 % Unfalltyp 7: 19.5 %
[3] Verteilung Schadenausmaß	Auswertung aus Tabelle 4 (und Tabelle 5 bzw. Tabelle 6 und Tabelle 7)
[5] Häufigkeit pro Jahr	Die Szenariohäufigkeit ergibt sich durch die Multiplikation der Häufigkeit des Initialereignisses mit allen bedingten Wahrscheinlichkeiten entlang des entsprechenden Wegs durch den Ereignisbaum.

Tab. 13: Wichtigste Verzweigungen Ereignisbaum Kollision, Fallbeispiel

1	2	3	4	5	6	7	8	9	8	
Initiale Ereignis KOLLISION	Unfalltyp: 1 / 3 / 6 / 7	Verteilung Schadenausmass	Schadenausmassklasse (Personenschäden)	Häufigkeit pro Jahr	Erwartetes Ausmass (Personenschäden)	Aversionsfaktor ϕ	R_p	Grenzkosten [€]	R_{FF}	
1.13E+00	24.4%	99.25000%	Keine Todesopfer	2.74E-01	0	0.0	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		0.59000%	1 Todesopfer	1.63E-03	1	1.0	1.6E-03	5.0E+06	8.1E+03	
		0.15000%	2-3 Todesopfer	4.14E-04	2	1.4	1.2E-03	5.0E+06	5.8E+03	
		0.01000%	4-9 Todesopfer	2.76E-05	5	2.2	3.1E-04	5.0E+06	1.5E+03	
		0.00010%	10-30 Todesopfer	2.76E-07	15	3.9	1.6E-05	5.0E+06	8.0E+01	
		0.00001%	> 30 Todesopfer	2.76E-08	35	5.9	5.7E-06	5.0E+06	2.9E+01	
		0.0%	99.50000%	Keine Todesopfer	0.00E+00	0	0.0	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00
	56.1%	0.42000%	1 Todesopfer	0.00E+00	1	1.0	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		0.07000%	2-3 Todesopfer	0.00E+00	2	1.4	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		0.01000%	4-9 Todesopfer	0.00E+00	5	2.2	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		0.00010%	10-30 Todesopfer	0.00E+00	15	3.9	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		0.00001%	> 30 Todesopfer	0.00E+00	35	5.9	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00	
		19.5%	99.00000%	Keine Todesopfer	6.28E-01	0	0.0	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00
			0.72000%	1 Todesopfer	4.56E-03	1	1.0	4.6E-03	5.0E+06	2.3E+04
	0.27000%		2-3 Todesopfer	1.71E-03	2	1.4	4.8E-03	5.0E+06	2.4E+04	
	0.01000%		4-9 Todesopfer	6.34E-05	5	2.2	7.1E-04	5.0E+06	3.5E+03	
	0.00010%		10-30 Todesopfer	6.34E-07	15	3.9	3.7E-05	5.0E+06	1.8E+02	
	0.00001%		> 30 Todesopfer	6.34E-08	35	5.9	1.3E-05	5.0E+06	6.6E+01	
	19.5%		99.50000%	Keine Todesopfer	2.19E-01	0	0.0	0.0E+00	5.0E+06	0.0E+00
		0.42000%	1 Todesopfer	9.25E-04	1	1.0	9.3E-04	5.0E+06	4.6E+03	
		0.07000%	2-3 Todesopfer	1.54E-04	2	1.4	4.4E-04	5.0E+06	2.2E+03	
		0.01000%	4-9 Todesopfer	2.20E-05	5	2.2	2.5E-04	5.0E+06	1.2E+03	
		0.00010%	10-30 Todesopfer	2.20E-07	15	3.9	1.3E-05	5.0E+06	6.4E+01	
		0.00001%	> 30 Todesopfer	2.20E-08	35	5.9	4.6E-06	5.0E+06	2.3E+01	

Bild 18: Exemplarischer Ereignisbaum Kollision, Fallbeispiel, Röhre 1, Schadenindikator Todesopfer

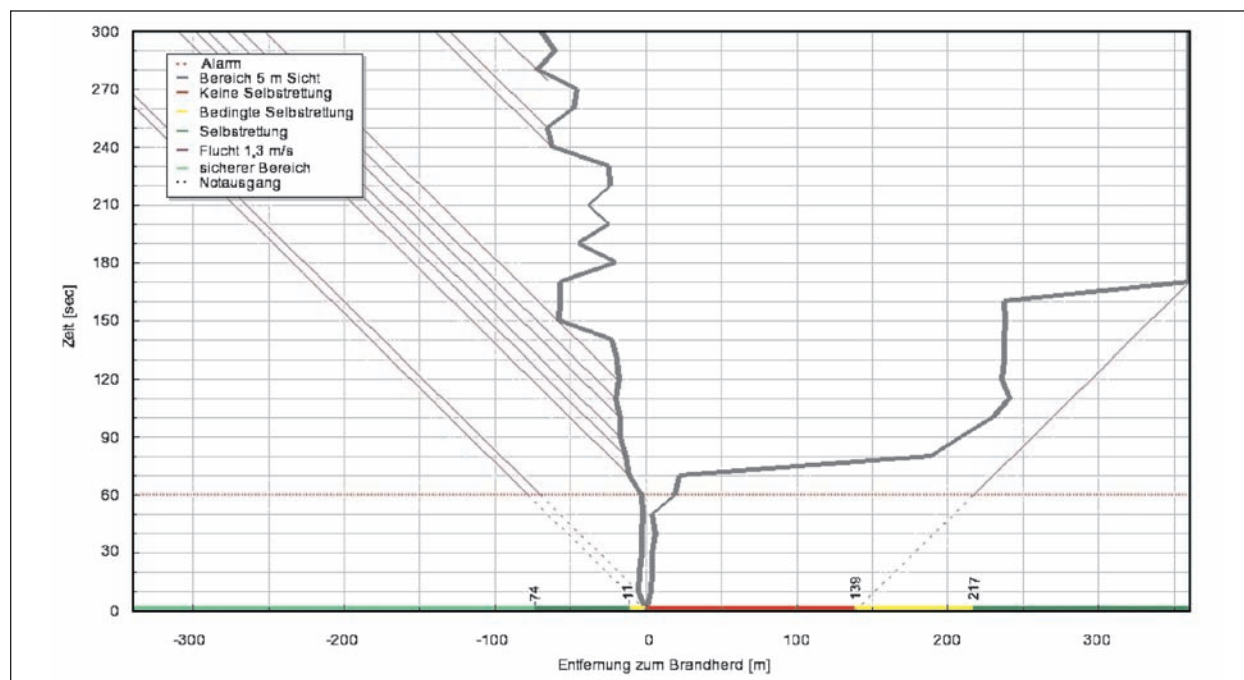


Bild 19: Exemplarische Darstellung Ermittlung Ausmaß Todesopfer (Situation: Röhre 1, freier Verkehrsfluss, 30 MW Brand, mit Lüftung)

Verzweigung Ereignisbaum	Bemerkungen								
[1] Initialereignis Brand	Das Initialereignis Brand bzw. die entsprechende Eintretenshäufigkeit eines Brandes mit mindestens 5 MW Brandleistung für den Tunnel beträgt 0.032 Brände pro Jahr. Diese Häufigkeit setzt sich zusammen aus der Häufigkeit eines Brandes infolge einer Kollision (0.007 Brände pro Jahr) und infolge eines technischen Defekts (0.025 Brände pro Jahr).								
[2] Ereignisort	Bei einer Tunnellänge von 704 und der beschriebenen Annahme, dass der Portalbereich jeweils eine Länge von 100 m (insgesamt pro Röhre also 200 m) umfasst, ergibt sich eine Verteilung von 28 % bzw. 72 %								
[3] Fließender Verkehr/Stau	Es wird angenommen, dass jährlich rund 250 Staustunden zu verzeichnen sind. Dementsprechend kann die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Brand zum Zeitpunkt eines Staus ereignet, mit 3 % abgeschätzt werden.								
[4] Detektion/Lüftung	Es wird von einer resultierenden Ausfallrate von 1 % ausgegangen.								
[5] Brandlast	<table border="0"> <tr> <td>- 5 MW:</td> <td>90.00 %</td> </tr> <tr> <td>- 30 MW:</td> <td>9.90 %</td> </tr> <tr> <td>- 50 MW:</td> <td>0.09 %</td> </tr> <tr> <td>- 100 MW:</td> <td>0.01 %</td> </tr> </table>	- 5 MW:	90.00 %	- 30 MW:	9.90 %	- 50 MW:	0.09 %	- 100 MW:	0.01 %
- 5 MW:	90.00 %								
- 30 MW:	9.90 %								
- 50 MW:	0.09 %								
- 100 MW:	0.01 %								
[8] Modellwert Schadenausmaß	<p>Für die Abschätzung des Schadenausmaßes wurden für ausgewählte Fälle Brandsimulationen mit FDS (Fire Dynamic Simulator) vorgenommen.* Dabei können sowohl die geometrischen Verhältnisse des Tunnels als auch die Wirkung der Brandlüftung, die jeweilige Brandleistung sowie die aus Blickwinkel der Rauchgasausbreitung relevanten Anfangsbedingungen (Verkehrsfluss oder Stau) abgebildet werden. Anhand der beschriebenen Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Selbstrettung (in Abhängigkeit der ortsspezifischen Fluchtmöglichkeiten) wurde die resultierende Zahl der Todesopfer ermittelt. Für die Abschätzung der Letalitäten in Abhängigkeit der Selbstrettungsbedingungen wurde von folgenden Werten ausgegangen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Keine Selbstrettung: 100 % Letalität - Bedingte Selbstrettung: 30 % Letalität - Selbstrettung: 5 % Letalität - Sicherer Bereich: 0 % Letalität <p>Eine exemplarische Darstellung der Ermittlung der Todesopferzahlen auf Basis der mittels FDS berechneten Rauchgasausbreitungen ist in Bild 19 dargestellt. Das Vorgehen hierzu wird unter Verzweigung 8 beschrieben.</p>								
* Die Modellierung und Berechnung einzelner Teilszenarien mit FDS erfordern einen verhältnismäßig hohen Aufwand. Aus diesem Grund wurde für einen Teil der Teilszenarien auf Basis der ermittelten Modellwerte das Schadenausmaß über Analogieschlüsse/Abschätzungen hergeleitet.									

Tab. 14: Verzweigungen Ereignisbaum Brand, Fallbeispiel

5.3 Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“

In Tabelle 14 sind die wichtigsten Einflussgrößen zur Ermittlung der Ereignishäufigkeiten und Schadenausmaße für den Szenariotyp Brand zusammengefasst.

5.4 Ergebnisse

Anhand der mit der vorliegenden Methodik ermittelten Risiken können folgende Schadenerwartungswerte abgeschätzt werden:

- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Kollisionen liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.02 Todesopfern pro Jahr. Somit ist statistisch etwa alle 50 Jahre mit einer Kollision mit Todesfolge im Tunnel A zu rechnen.
- Das kollektive Risiko (Schadenerwartungswert) für Brandereignisse liegt für den Schadenindikator Todesopfer bei 0.002 Todesopfern pro Jahr. Somit wäre statistisch etwa alle 500 Jahre mit einem Brandereignis mit Todesfolge im Tunnel A zu rechnen.
- Das monetarisierte Risiko R_m liegt bei rund € 245.000.- pro Jahr und wird primär durch den Schadenindikator Todesopfer bestimmt (rund € 175.000.- pro Jahr). Hierbei wiederum entfällt mit rund 80 % der überwiegende Teil auf den Szenariotyp Kollision.

Aus Bild 20 ist der Verlauf der ermittelten, normierten Summenkurven ersichtlich. Die resultierende Gesamtsummenkurve wird wie folgt charakterisiert:

- Im Bereich der kleinen Schadenausmaße (bis rund 10 Todesopfer) dominiert der Einfluss des

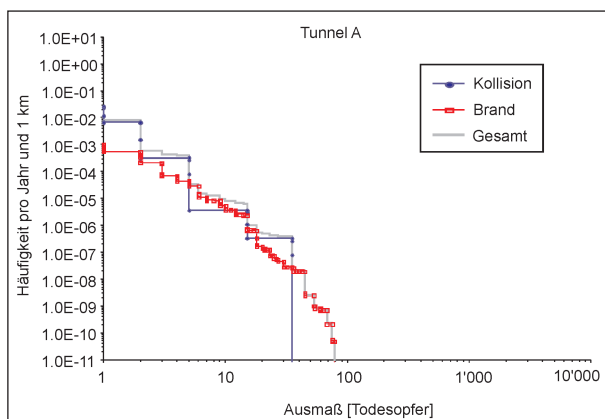


Bild 20: Normierte Summenkurven für den Fallbeispiel-Tunnel A

Szenariotyps Kollision. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ereignisse insgesamt deutlich häufiger auftreten als Brände.

- Im Bereich der Schadenausmaße zwischen 10 bis etwa 30 Todesopfer ist der Einfluss der beiden Szenariotypen auf den Verlauf der Gesamtsummenkurve in etwa vergleichbar.
- Im Bereich der großen Schadenausmaße bestimmt der Szenariotyp Brand den Verlauf der Gesamtsummenkurve. Das maximale Schadenausmaß wird typischerweise aufgrund der potenziell großen Wirkbereiche von Bränden (Rauchgasausbreitung) durch den Szenariotyp Brand bestimmt.

6 Fazit und Zusammenfassung

Die Brandereignisse der vergangenen Jahre in verschiedenen europäischen Straßentunneln haben die Diskussion um die Sicherheit und die damit verbundenen Anstrengungen zur weiteren Risikominderung weiter verstärkt. Die Forderungen in den Richtlinien RABT 2006 bzw. 2004/54/EG zeigen, dass auch auf Ebene der normativen Vorgaben immer mehr risikoorientierte Betrachtungsweisen in den Vordergrund rücken. Im Gegensatz zu den maßnahmenorientierten Ansätzen ermöglichen sie verstärkt die Berücksichtigung spezifischer Tunnelcharakteristika in der Planung von Sicherheitsüberlegungen.

Mit der vorgelegten Methodik werden die in den Richtlinien RABT 2006 bzw. 2004/54/EG formulierten Anforderungen hinsichtlich einer risikoorientierten Betrachtung konkretisiert. Damit werden die Vorgaben für eine einheitliche und vergleichbare Durchführung von Sicherheitsbeurteilungen geschaffen. Bei der Entwicklung der Methodik wurden die Erfahrungen aus anderen, vergleichbaren Sicherheitsbereichen herangezogen und die entsprechenden Ansätze auf ihre Tauglichkeit für eine Anwendung im vorliegenden Kontext geprüft. Daneben wurden die aktuellen Entwicklungen und methodischen Ansätze zur Umsetzung der Forderungen gemäß Artikel 13 der Richtlinie 2004/54/EG im Ausland analysiert und die entsprechenden Erkenntnisse so weit sinnvoll in die Entwicklung der Methodik einbezogen. Der vorliegende Vorschlag basiert in seinen methodischen Grundsätzen und dem gewählten Vorgehen auf einem risikoorientierten Ansatz, wie er in verschiedenen Ländern zu un-

terschiedlichsten Sicherheitsfragen bereits erfolgreich angewandt wird.

Bei der Erarbeitung der Methodik wurde darauf geachtet, dass der gewählte Ansatz neben der Abstützung auf wissenschaftlichen Grundlagen im Hinblick auf die künftige Anwendung auch einen engen praxisorientierten Bezug aufweist. Die Methodik gibt bewusst nicht zu allen Aspekten „rezeptartige“ Vorgaben vor, sondern definiert einen Rahmen, innerhalb dessen die konkrete Anwendung durchzuführen ist. In Anbetracht der Vielfalt und Komplexität heutiger Tunnelbauwerke sowie der zugehörigen Infrastrukturen und deren Interaktionen gilt es, die maßgeblichen methodischen Grundsätze festzulegen. Innerhalb dieser definierten Grenzen muss dem Anwender die Möglichkeit zur Berücksichtigung spezifischer Charakteristika eines Tunnels gegeben werden.

Die vorgeschlagene Methodik zur Sicherheitsbewertung basiert auf einer quantitativen Analyse der Risiken und ermöglicht die Berücksichtigung der wesentlichen risikorelevanten Einflussgrößen. Für die Quantifizierung sind teilweise Annahmen zu treffen, da nicht zu allen Aspekten ausreichende Grundlagen und statistische Daten vorhanden sind. Die quantitative Vorgehensweise aber ermöglicht es, die getroffenen Annahmen transparent darzulegen. Wenn zu einem späteren Zeitpunkt umfangreichere Grundlagendaten vorliegen, können die einzelnen Einflussgrößen bzw. deren quantitative Werte bei Bedarf angepasst werden, an der grundsätzlichen methodischen Vorgehensweise aber müssen keine Anpassungen vorgenommen werden. Zudem lässt die Methodik auch die Berücksichtigung zusätzlicher Einflussgrößen zu, ohne dass die Grundprinzipien des Vorgehens geändert werden müssen. Zur künftigen Verbesserung der Abschätzung der Ereignishäufigkeiten ist es erforderlich, dass die im Rahmen des Forschungsprojektes vorgenommene Unfallanalyse weiter fortgeführt und ergänzt wird.

Während die eigentliche Risikoanalyse über die Höhe der Risiken Auskunft gibt, wird im Rahmen der Risikobewertung ihre Tragbarkeit beurteilt. Im Grundsatz wird davon ausgegangen, dass ein richtlinienkonformer Tunnel als sicher zu beurteilen ist und zu diesem Zweck die Risiken eines geplanten Tunnels, der die Richtlinienanforderungen nicht erfüllt, denjenigen des gleichen Tunnels mit richtlinienkonformer Ausstattung gegenüberzustellen sind. Mit diesem maßnahmenorientierten Ansatz

wird jedoch kein einheitliches Sicherheitsniveau definiert, da für verschiedene Tunnel auch bei richtlinienkonformer Ausstattung unterschiedliche Risiken resultieren werden. Aus diesem Grund wird empfohlen, den vorgeschlagenen Ansatz des Festlegens eines quantitativen Sicherheitsziels (Akzeptabilitätsbereiche im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm) weiter zu verfolgen. Zudem wird vorgeschlagen, dass eine verstärkte Planung von Sicherheitsmaßnahmen auf Basis der Kosten-Wirksamkeit geprüft wird.

7 Empfehlungen für das Regelwerk und weiterer Forschungsbedarf

Die vorgeschlagene Methodik legt das Vorgehen zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln und den zugehörigen Grundsätzen fest. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Regelwerks werden auf Basis der Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt folgende Empfehlungen abgegeben:

- Datengrundlagen: Eine wichtige Grundlage für die Quantifizierung der Risiken stellen die Auswertungen aus dem Unfallgeschehen dar. Es wird empfohlen, die vorliegenden Grundlagen weiter zu ergänzen und die statistischen Auswertungen fortzuführen. Dies ermöglicht es, die vorliegenden Daten für künftige Risikoanalysen besser abzustützen und etwaige weitere relevanten Einflussfaktoren aufzuzeigen.
- Die vorgenommene Unfallanalyse hat gezeigt, dass die bei einem Unfall erfassten Informationen für die Zwecke einer Risikoanalyse teilweise ungenügend sind. So sind beispielsweise die Ortsangaben oft ungenau und/oder unplausibel oder es fehlen Angaben zu den jeweiligen Begleitumständen bei einem Unfall. Ziel einer quantitativen Risikoanalyse ist es u. a., die verschiedenen Einflussgrößen und ihre Interaktionen abzubilden. Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, wenn bei der künftigen Auswertung von Unfallereignissen konkretere Angaben hierzu vorliegen würden, um die Ursachen und Wirkungsketten von Ereignissen auch in der Risikoanalyse bzw. den statistischen Grunddaten besser abbilden zu können. Dies ist z. B. über eine Anbringung der Kilometrierung an jedem Tunnelblock möglich, welche die räumliche Zuordnung erheblich erleichtert.

Im Gegensatz zu den Unfallereignissen werden heute kaum systematische Auswertungen zu Betriebsstörungen und technischen Defekten der Tunnelinfrastruktur vorgenommen. Es wäre wünschenswert, wenn künftig entsprechende Grundlagen hierzu erhoben würden. Diese Informationen könnten überdies neben dem Aspekt der Risikoanalyse auch aus Blickwinkel der Erhaltungsplanung von Anlagen etc. von Nutzen sein.

- **Bewertungskriterien:** Es wird empfohlen, den vorgeschlagenen Ansatz eines einheitlichen, absoluten Risikobewertungskriteriums weiter zu verfolgen. Eine Bewertung, welche nur auf einem relativen Vergleich mit der richtlinienkonformen Ausstattung eines Tunnels basiert, erscheint aus Sicht des Forschungsnehmers ungenügend, da damit zwar ein einheitlicher Ausrüstungsstandard, jedoch kein einheitliches minimales Sicherheitsniveau geschaffen wird. Vielmehr sollte ein absolutes Risikobewertungskriterium festgelegt werden, welches ein einheitliches Mindestsicherheitsniveau festlegt. Zudem wird vorgeschlagen, dass eine verstärkte Planung von Sicherheitsmaßnahmen auf Basis der Kosten-Wirksamkeit geprüft wird.
- **Risikoanalysen für Gefahrguttransporte:** Gemäß RABT 2006 sind für alle Tunnel vor der Zulassung von Gefahrguttransporten Risikoanalysen durchzuführen. Hierzu bestehen bereits methodische Ansätze (OECD/PIARC-Modell und gleichwertige andere Modelle). Es wird vorgeschlagen, im Rahmen einer Untersuchung zu prüfen, inwieweit die Ergebnisse dieser Modelle konsistent sind und welche Skalierung der Ergebnisse gegebenenfalls erforderlich ist, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen.

Für die Gefahrgutrisikoanalysen hat es sich eingebürgert, dass jeweils nicht nur ein Tunnel alleine untersucht wird, sondern dass die Risiken der Tunnelstrecke denjenigen einer möglichen Alternativroute gegenübergestellt werden. Konkrete Vorgaben, auf welcher Basis die Risikobewertung zu erfolgen hat (Vergleich der Summenkurven im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, kollektive Risiken etc.) fehlen jedoch noch. Es sind deshalb entsprechende Vorgaben zu erarbeiten.

- **Auswertung der Erfahrungen mit Risikoanalysen:** Es wird empfohlen, die Erfahrungen bei der Durchführung von Risikoanalysen systematisch zu erheben/sammeln und auszuwerten.

Literatur

Hinweis:

Die Literaturbezüge der Anhänge verweisen ebenfalls auf dieses Literaturverzeichnis.

- [1] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union: Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, 29. April 2004
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln – RABT, Ausgabe 2006
- [3] FIT European Thematic Network, Workpackage 3 Compilation of Guidelines for Fire safe Design: Fire Safe Design Road Tunnels (Draft 2), September 2003
- [4] Circulaire interministérielle n° 2000-63 : Relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national, 25. August 2000
- [5] Circulaire interministérielle n° 2000-82: Relative à la réglementation de la circulation des Véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels du réseau routier national, 25. August 2000
- [6] Centre d'Etudes des Tunnels: Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, Fascicule 4, Les études spécifiques des dangers (ESD), ENTWURF, September 2003
- [7] The Highway Agency, The Scottish Executive Development Department, The National Assembly for Wales Cynulliad Cenedlaethol Cymru, Department of the Environment for Northern Ireland: Design Manual for Roads and Bridges, Volume 2, Highway Structures Design (Substructures and Special Structures), Materials, Section 2: Special Structures, Part 9, BD 78/99 Design of Road Tunnels, August 1999
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Tunnel, Projektierungsrichtlinien: RVS 9.234 Innenausbau, 18. September 2001

- [9] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Tunnel, Projektierungsrichtlinien RVS 9.261 Lüftungsanlagen, Grundlagen, 25. Januar 2001
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Tunnel, Projektierungsrichtlinien: RVS 9.281 Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Bauliche Anlagen, 4. Juli 2002
- [11] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Tunnel, Projektierungsrichtlinien: RVS 9.282 Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung, 4. Juli 2002
- [12] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA): SN 505 197, Projektierung Tunnel – Grundlagen, August 2004
- [13] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), SN 505 197/2, Projektierung Tunnel – Straßentunnel, August 2004
- [14] Bundesamt für Straßen ASTRA: Richtlinie Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in den Tunnels, Entwurf, Ausgabe 2004
- [15] Bundesamt für Straßen ASTRA: Richtlinie Lüftung der Straßentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, Ausgabe 2004
- [16] Organisation for Economic Co-Operation and Development OECD, World Road Association PIARC: Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels, 2001
- [17] SR 814.012: Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung StfV) vom 27. Februar 1991, Stand am 28. März 2000
- [18] Veiledning til NS 3901: Risikoanalyse av brann i byggverk – Risikoanalyse av brann i vegtunneler, Guide to NS 3901 Risk analysis of fire in buildings and civil engineering works, Ausgabe 2000
- [19] Bundesministerium für Verkehr: Bewertungsverfahren für Sicherheitsfragen im Eisenbahnbetrieb (FE-Nr. 60329/95), Schlussbericht zuhanden des forschungsbegleitenden Arbeitskreises, Ernst Basler + Partner AG, 1996
- [20] SafeT, Work Package 5, Task 5.1: D5.1 Report – Harmonised Risk Assessment, 2nd Draft, November 2004
- [21] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 25424, Teil 1 – Fehlerbaumanalyse, Methode und Bildzeichen, Beuth Verlag, September 1981
- [22] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 25424, Teil 2 – Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes, Beuth Verlag, April 1990
- [23] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 25419 – Ereignisablaufanalyse, Verfahren, grafische Symbole und Auswertung, Beuth Verlag, November 1985
- [24] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 13943 – Brandschutz, Vokabular, Beuth Verlag, Oktober 2000
- [25] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 14971 – Medizinprodukte, Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte, Beuth Verlag, März 2001
- [26] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 61508-4 (VDE 0803 Teil 4) – Funktionale Sicherheit elektrischer/elektronischer/programmierbarer sicherheitsbezogener Systeme, Teil 4, Begriffe und Abkürzungen, Beuth Verlag, November 2002
- [27] Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN VDE 31000, Teil 2 – Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse; Begriffe der Sicherheitstechnik; Grundbegriffe, VDE Verlag, Dezember 2002
- [28] National Fire Protection Association (NFPA): NFPA 502, Standard for Road Tunnels, Bridges, and other limited Access Highways, 2004 Edition
- [29] PIARC C3.3 – WG2 – Topic 2 – Risk Analysis: Risk Analysis for Road Tunnels: Subgroup 2 – Risk Analysis, Draft Version March 2006 (noch nicht veröffentlicht)
- [30] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen – Teil 1: Führen und Auswerten von Unfalltypen-Steckkarten, FGSV-Verlag, Köln 1998

- [31] Statistisches Bundesamt Wiesbaden: Verkehr, Reihe 7, Verkehrsunfälle, Fachserie 8, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart 1996
- [32] Die Zeitgleichung: Eine einfache Formel zu Sonnenaufgang und Untergang, <http://lexikon.astronomie.info/zeitgleichung/>, Februar 2006
- [33] Polizeiinspektion Aachen Stadt: Verkehrsunfallanzeige, März 2006
- [34] Ministerialblatt für das Land Nordrhein-Westfalen: Ausgabe vom 7. Juli 1998, Anweisung zum Ausfüllen von Verkehrsunfallanzeigen, Düsseldorf 1998
- [35] Deutscher Wetterdienst: Lexikon zu meteorologischen Begriffen, www.wetter.com, Stand Februar 2006
- [36] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN), FGSV-Verlag, Köln 2003
- [37] HEIDEMANN, D. et al.: Standstreifen und Verkehrssicherheit auf BAB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Verkehrstechnik, Heft V 55, Bergisch Gladbach 1998
- [38] BRILON, W., LEMKE, K.: Straßenquerschnitte in Tunneln, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Unterreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“, Heft 785, Bonn 2000
- [39] ROBATSCH, K., NUSSBAUMER, C.: Verkehrssicherheitsvergleich von Tunneln mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr in Österreich, Straße + Autobahn, Heft 55, Kirschbaum Verlag, Bonn 2004
- [40] ROBATSCH, K., NUSSBAUMER, C.: Sicherheitsvergleich von Tunneln, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung, Heft 552, Wien 2005
- [41] SALVISBERG, U. et al.: Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostraßentunneln des Nationalstraßennetzes, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, Report 51, Bern 2004
- [42] KAYSER, H. J. et al.: Zulässigkeit und Einsatzkriterien von Ein- und Ausfahrten in Tunneln, Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, RWTH Aachen, Aachen 1985
- [43] AIPCR/PIARC: Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Committee on Road Tunnels (C5), 1999
- [44] AIPCR/PIARC: Road Safety in Tunnels, Committee on Road Tunnels, 1995
- [45] MAYER, G. (2006): Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Dissertation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- [46] National Highway Traffic Safety Administration NHTSA: Motor Vehicle Fires in Traffic Crashes and the Effects of the Fuel System Integrity Standard, Report No DOT HS 807 675, November 1990
- [47] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Empfehlungen für das Sicherheitsaudit von Straßen ESAS, FGSV-Verlag, Heft 298, Ausgabe 2002

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
bahntafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städling, Krocker € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brü-
ckenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen
im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardej, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack € 14,50

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expo-
sitionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung
der Durchführung und Auswertung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teiler-
neuerung - Bewehrung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutz-
plankenpfosten
Schröder, Staack € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unter-
füllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an
einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4
Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1
Hagen/Schwerte

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig
unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,
Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.