

Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 58

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

von

Christof Sistenich

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 58

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, Referat 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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 04 233
des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel**

Herausgeber

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

Redaktion

Referat 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 978-3-86509-751-4

Bergisch Gladbach, November 2007

Kurzfassung – Abstract

Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Schwere Brandunfälle in einigen Straßentunneln der Alpenländer in den Jahren 1999 und 2001 waren mit ein Auslöser für eine weitere Verbesserung der Sicherheit in Straßentunneln. Normative Ergebnisse diesbezüglich geführter Diskussionen mündeten europaweit in der „Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Mindestanforderungen für die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ (2004/54/EG) (EG-Tunnelrichtlinie). Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie wurden national in den „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT), Ausgabe 2006, umgesetzt.

Ein möglichst einheitlicher Standard insbesondere bei den Sicherheitseinrichtungen, wird im Normalfall durch einen in den Regelwerken fest umrissenen und vorgegebenen Ausstattungsumfang erreicht. In besonderen Fällen ist jedoch die Notwendigkeit und der Umfang eines über dem Normalfall liegenden Ausstattungsniveaus mit ergänzenden Verfahren zu ermitteln. Hierfür, sowie zur Überprüfung der Wirksamkeit einzelner Sicherheitsmaßnahmen, werden Nachweise mittels Risikoanalysen gefordert. Weder die EG-Tunnelrichtlinie noch die RABT 2006 differenzieren jedoch zwischen unterschiedlichen „Arten“ von Risikoanalysen, entweder zur Ermittlung der Tunnelausstattung bei „Tunneln mit besonderer Charakteristik“ oder bei der Zulassung von Gefahrgut. Andererseits sehen beide Regelwerke den Einsatz von Ausstattungselementen auch für einen sicheren Transport von Gefahrgütern durch Straßentunnel vor.

Auf der Basis bestehender normativer und methodischer Vorgaben aus Regelwerken und Richtlinien sowie von Methoden, Ansätzen und Modellen, wird ein mögliches Vorgehen für eine risikoanalytische Untersuchung von Straßentunneln dargestellt. Es basiert auf einem risikoorientierten Ansatz, mit den Einzelschritten Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung.

Bei der Risikoanalyse werden mögliche Ereignisse und deren Abläufe bestimmt. Die Risikoanalyse versucht vereinfacht die Frage zu beantworten: „Was kann wie oft passieren und was sind die Folgen?“ Die Risikoanalyse gibt Auskunft über die Höhe der Risiken.

In der sich anschließenden Risikobewertung wird die Entscheidung getroffen, ob und welche Risikominimierungen vorgenommen werden müssen. Hier wird die Frage versucht zu klären: „Was darf wie oft passieren?“. Es wird letztlich die Akzeptanz der ermittelten Risiken bestimmt.

Die Maßnahmenplanung/-beurteilung umfasst die Ermittlung und Beurteilung risikomindernder Maßnahmen auch im Zusammenhang mit den hierbei entstehenden Kosten. Beantwortet werden soll die Frage: „Welche Maßnahmen müssen für eine ausreichende Sicherheit des Systems getroffen werden?“

Für die innerhalb einer risikobezogenen Untersuchung abzuarbeitenden vorgenannten Schritte Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung steht eine große Bandbreite qualitativer und quantitativer Methoden bzw. Modelle zur Verfügung. Die im Bericht vorgenommene Darstellung der in einzelnen Ländern durchgeführten Praxis zeigt auf, dass eine Kombination unterschiedlicher Methoden bzw. Modelle verwendet wird.

Einschränkungen bei der praktischen Anwendung ergeben sich durch die noch schmale Datenbasis bei Ereignis- und Versagenshäufigkeiten betriebstechnischer Ausstattungselemente oder verkehrlicher Störfälle. Die weitere Erhebung und Auswertung betrieblicher und verkehrlicher Störfälle in Tunneln ist daher anzustreben. Eine Häufigkeits-/Ausmaßermittlung und eine darauf fußende Risikoberechnung ist derzeit für den Bereich Straßentunnel noch mit Unsicherheiten behaftet, die bei der Interpretation der aus einer quantitativen risikobezogenen Ausarbeitung gewonnenen Ergebnisse einbezogen werden müssen.

Bei der Bewertung von Maßnahmen sind neben ihrer risikomindernden Wirkung auch die mit ihrer Realisierung bzw. ihrem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Als Realisierungskriterium gilt einerseits ein geringeres Verhältnis von Kosten und jeweiliger Risikominderung einer Alternativ-Maßnahme gegenüber der Ausgangsmaßnahme, andererseits eine Kostenobergrenze in Bezug auf eine anzustrebende Risikominderung.

Hinsichtlich der Risikobewertung sind weitere Untersuchungen, Diskussionen und Erfahrungswerte erforderlich, um zukünftig eventuell Akzeptanzbe-

reiche als Entscheidungsgrenzen festlegen zu können. Eine Verbreiterung des Untersuchungsansatzes zur Risikodarstellung sowie die Konzeption eines Verfahrens zur Risikobewertung von Straßentunneln einschließlich Empfehlungen für seine Anwendung ist anzustreben.

Quantitative risk analyses for road tunnels

Serious fires in some road tunnels in the Alpine countries during the years 1999 and 2001 served as a trigger for further improvements of safety in road tunnels. The normative results of the discussions held in this regard resulted in the "Guidelines of the European Parliament and the Council on Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network" (2004/54/EC) (EC Tunnel Guideline). The specifications of the EC Tunnel Guideline were implemented on a national basis in the "Guidelines for Equipping and Operating Road Tunnels" (RABT), Edition 2006.

The most uniform standard possible, especially in the case of safety installations, is usually achieved with equipment that is clearly defined and specified in the rules and regulations. However, in special cases, the necessity and scope of additional equipment must be determined by using supplementary procedures. To do this, as well as to check the effectiveness of individual safety measures, proof is obtained by conducting a risk analysis. Neither the EC Tunnel Guideline nor the RABT 2006, however, differentiate between different "types" of risk analyses, either to determine the tunnel installations for "tunnels with special characteristics" or when approving hazardous substances. On the other hand, both sets of rules and regulations make provision for the use of equipment for the safe transport of hazardous substances through road tunnels.

A possible procedure for a risk analysis of road tunnels is presented on the basis of existing norms and methods contained in the rules and regulations, as well as various other methods, approaches and models. It is based on a risk-oriented approach, with the individual steps "risk analysis", "risk assessment" and "planning/evaluation of measures".

During the risk analysis, possible events and their courses are determined. The risk analysis tries to find a simple answer to the question: "What can happen how often, and what are the

consequences?" The risk analysis provides information about the degrees of risk.

In the subsequent risk assessment, a decision is taken whether and which risk minimisations must be carried out. The question asked in this case is: "What may happen how often?" Ultimately, the acceptance of the risks determined is established.

The planning/evaluation of measures comprises determining and evaluating risk-reducing measures, also in relation to the costs incurred. The question to be answered is: "Which measures must be taken to ensure the adequate safety of the system?"

A large number of qualitative and quantitative methods and models are available to carry out the steps of risk analysis, risk assessment and planning/evaluation of measures within the context of a risk-related investigation. The presentation of the practices in various countries reported on shows that a combination of different methods or models is used.

There are some limitations regarding practical implementation, resulting from the rather small database on the frequency of events, the failure of technical equipment and traffic incidents. The continued collection and evaluation of technical and traffic incidents in tunnels should therefore be striven for. A frequency/extent investigation and the risk calculations based on this with regard to road tunnels are currently still fraught with uncertainties that must be incorporated into the interpretation of the results obtained during quantitative, risk-related planning.

When evaluating measures, both their risk-reducing effect and the costs incurred in their implementation/operation must be estimated. On the one hand, the criterion for realisation is that of the lower cost or risk of various alternatives in comparison with the initial measure, while on the other hand there is an upper cost limit that determines to what extent risks can be reduced.

As far as the risk assessment is concerned, further investigations, discussions and experience are required in order to define future acceptance ranges for decision-making purposes. A broadening of the investigative approach to risk presentation, as well as the design of a procedure for the risk assessment of road tunnels, including recommendations for implementation, must be striven for.

Inhalt

1	Einleitung	9	5.6	Deutschland	35
2	Problem, Ziel und Nutzen des Forschungsvorhabens	9	5.7	OECD/PIARC QRA Modell für Gefahrguttransport	38
3	Vorgaben an eine risikobezogene Untersuchungsmethodik für Straßentunnel	10	6	Beurteilung der Verfahren	40
3.1	Allgemeines	10	6.1	Erfahrungen aus der Anwendung der Verfahren	40
3.2	Vorgaben aus Regelwerken	10	6.1.1	Allgemeines	40
3.3	Methodische Anforderungen	15	6.1.2	Länderspezifische Erfahrungen	40
4	Risikobezogene Untersuchungsmethoden und Verfahren	17	6.1.3	Gefahrgut	41
4.1	Allgemeines	17	6.1.4	Besondere Charakteristik	42
4.2	Begriffe	17	6.2	Erfüllung der Richtlinien-Anforderungen	42
4.3	Methodische Grundlagen	18	6.3	Umsetzung des Untersuchungsprozesses	42
4.3.1	Allgemeines	18	6.4	Empfehlungen	44
4.3.2	Qualitative Methoden	18	7	Zusammenfassung und Ausblick	45
4.3.3	Quantitative Methoden	18	Literatur		48
4.4	Anwendung	22			
4.4.1	Methoden und Ansätze	22			
4.4.2	Datenerhebung	22			
4.5	Untersuchungsprozess für Straßentunnel	24			
5	Länderspezifisch realisierte Methoden	26			
5.1	Allgemeines	26			
5.2	Frankreich – spezifische Gefährdungsuntersuchung	26			
5.3	Italienische Gefahrenanalyse für Straßentunnel	28			
5.4	Niederlande	30			
5.4.1	Allgemeines	30			
5.4.2	Szenarienanalyse	30			
5.4.3	Tunprim-Modell	32			
5.5	Österreichisches Tunnel-Risikoanalysemodell TuRisMo	32			

Glossar

nach [3], [4]

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, den so genannten Ausgangsereignissen beschränkt (siehe auch →Folgeereignis).
Eintretenshäufigkeit	Frequency	Häufigkeit, dass ein bestimmtes Ereignis innerhalb eines vorgegebenen Zeiteinabschnitts (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.
Eintrittswahrscheinlichkeitsanalyse	Probability analysis	Ein systematisches Vorgehen, um die Eintretenswahrscheinlichkeit von nachfolgenden Ereignissen zu beschreiben und/oder zu berechnen.
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).
Erwartungswert	Expected value	Die Summe der Häufigkeiten/Möglichkeiten des Auftretens von Ereignissen oder Szenarien multipliziert mit ihren jeweiligen Wirkungen.
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).
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.
Gefährdungsermittlung	Hazard identification	Ein Vorgang, Gefährdungen zu erkennen und ihre grundlegenden Merkmale zu definieren.
Häufigkeit	Frequency	Die Anzahl wie oft ein festgelegtes Ereignis innerhalb eines festgelegten Zeitraumes auftritt (z. B. Unfälle pro Jahr).
Häufigkeits-Ausmaß-Kurve (Diagramm)	FN curve	Ein Diagramm bei dem auf der Ordinate die aufsummierten Häufigkeitsverteilungen von N oder mehreren Auswirkungen (z. B. Todesfälle) und auf der Abszisse die zugehörigen Wirkungen dargestellt sind. Diese Kurve werden zum Darstellen von kollektivem Risiko verwendet.
Nachweiszustand	Verification 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.
Quantitative Risikoanalyse	QRA – Quantitative risk analysis	
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.
Restrisiko	Residual risk	Das verbleibendes Risiko, nachdem die Schutzmaßnahmen umgesetzt wurden.
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. Das Risiko entspricht dem Produkt aus Häufigkeit und Schadenausmaß.

Begriff (deutsch)	Begriff (englisch)	Erläuterung
Risikoaversion	Risk Aversion	Risiken infolge von seltenen Ereignissen mit großem Schadensmaß 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, 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.
Risikoabschätzung	Risk estimation	Ein Verfahren bzgl. der Herleitung von Risiken, welches auf der Wahrscheinlichkeitsanalyse und der Wirkungsanalyse basiert.
Risikoanalyse	Risk analysis	In der Risikoanalyse geht es darum, →Gefahren, →Ereignisse und →Auswirkungen – das heißt ganze →Ereignisabläufe – zu untersuchen, um die →Eintretenshäufigkeit (→Eintretenswahrscheinlichkeit) und das →Schadensmaß von Ereignissen zu ermitteln. Teil der →Sicherheitsbewertung.
Risikobeurteilung	Risk assessment	Ein gesamtheitlicher Prozess bestehend aus einer Risikoanalyse und einer Risikobewertung (ISO IEC 51)
Risikobewertung	Risk evaluation	Ein Verfahren, welches auf der der Risikoanalyse basiert, um festzustellen, ob ein akzeptables Risiko eingehalten wird (ISO IEC 51)
Risikoempfinden	Risk perception	Ist die Art, wie ein Betroffener, basierend auf einer Anzahl von Werten und Belangen, ein Risiko wahrnimmt/empfindet. Rechnerisch wird das empfundene Risiko R_e vom kollektiven Risiko R_0 , abgeleitet, indem das Schadensmaß A jedes Szenarios mit einem entsprechenden Aversionsfaktor $j(A)$ multipliziert wird.
Risikomanagement	Risk management	Ein systematischer Prozess, durch eine Organisation durchgeführt, um ein akzeptables Risiko zu erreichen und beizubehalten.
Risikoreduzierung	Risk reduction	Die Maßnahmen, die zur Reduktion der Risikowahrscheinlichkeit sowie zur Reduktion von negativen Konsequenzen daraus oder beiden, durchgeführt werden.
Schaden	Harm	Eine physische Verletzung von Personen oder Beschädigung des Eigentums oder der Umwelt.
Schadensmaß	Damage/Degree of damage	Unter dem Schadensmaß A (Ausmaß A) eines →Ereignisses wird der entstandene Schaden verstanden. Mögliche Schäden sind z. B. Personenschäden oder Sachschäden. Das Schadensmaß ist eine der beiden Komponenten für die Berechnung 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 Verification	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 nachgeführten →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	Consequence	Eine Einwirkung ist die physikalische Wirkung einer →Gefährdung, wenn sie auftritt (Beispiel: Luftstoß, Hitzeeinwirkung etc.).
Wirkungsanalyse	Consequence analysis	Eine systematische Vorgehensweise, um Wirkungen zu beschreiben und/oder zu berechnen.

1 Einleitung

Seit dem Jahr 1999 steht die Sicherheit in Straßentunneln verstärkt im Blickpunkt sowohl des öffentlichen Interesses als auch von Tunnelfachleuten. Die Erfahrung zeigt, dass sich Unfälle nicht nur auf der freien Strecke, sondern auch in Tunneln, wenn auch weniger häufig, ereignen. Die Häufigkeit, dass Unfälle sich zu Katastrophen entwickeln, wie im Mont-Blanc Tunnel, Tauerntunnel oder St. Gotthard Tunnel, ist in Relation zum gesamten Unfallgeschehen gering. Um so größer ist jedoch das Ausmaß solcher Ereignisse in Bezug auf die Anzahl der Opfer, Beschädigungen der Konstruktion und Auswirkungen auf den Verkehr. Diese Katastrophen haben sowohl zu einer Erhöhung des Gefahrenbewusstseins insgesamt beigetragen als auch die grundsätzliche Notwendigkeit von Verbesserungen sowohl bei der Vorsorge, Erkennung als auch Bewältigung von Ereignissen in Tunneln gezeigt.

Die zahlreichen Initiativen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene haben zu teilweise erheblich voneinander abweichenden Vorgaben an die Sicherheit von Straßentunneln geführt. Mit ihrer Einführung im Jahre 2004 bildet die „Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ (2004/54/EG), im Folgenden EG-Tunnelrichtlinie genannt [1], eine verpflichtende Klammer für die Mindestausstattung von sicherheitsrelevanten Einrichtungen zumindest in Straßentunneln des Transeuropäischen Straßennetzes (TERN). Hierunter fallen z. B. bauliche und betriebliche Sicherheitsmerkmale sowohl für neue Tunnel als auch Tunnel im Bestand, eine klare Aufgabendefinition und Festlegung von Verantwortlichkeiten für die Tunnelverwaltung und das Betriebspersonal sowie einen verbesserten Informationsfluss und eine bessere Kommunikation mit den Tunnelnutzern innerhalb und außerhalb ihrer Fahrzeuge.

Die Sicherheit in Straßentunneln wird aus einem von Infrastruktur, Tunnelbetrieb, Tunnelnutzer und Fahrzeugen gebildeten wechselwirkenden Zusammenhang bestimmt. Hierbei mindestens zu berücksichtigende Einflussgrößen zur Darstellung dieses Zusammenhangs und zur Festlegung von Mindestmaßnahmen sind in der EG-Tunnelrichtlinie explizit aufgeführt. Weist ein Tunnel bei einer einzelnen oder bei mehreren dieser genannten Einflussgrößen Besonderheiten, in der EG-Tunnelrichtlinie als „besondere Charakteristik“ bezeichnet, auf, ist

zu prüfen, ob eine Abweichung von den Mindestvorgaben für sicherheitsrelevante Einrichtungen notwendig wird. Die Untersuchung dieser sicherheitlichen Fragestellungen ist nach den Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie mittels einer Risikoanalyse vorzunehmen, wobei auf weitere Vorgaben hierzu verzichtet wurde. Hinsichtlich einer konkreten Ausgestaltung der geforderten Risikoanalyse waren und sind auch noch weiterhin die zur Umsetzung der EG-Tunnelrichtlinie verpflichteten EG-Mitgliedstaaten gefordert.

In diesem Bericht werden, ausgehend davon, in welchen Fällen eine Risikoanalyse durchzuführen ist, wesentliche Ergebnisse der inzwischen zu dieser Thematik durchgeführten Untersuchungen dazu genutzt, Anforderungen an eine straßentunnelspezifische risikobezogene Untersuchungsmethodik abzuleiten. Bereits vorhandene methodische Ansätze und durchgeführte Verfahren werden den Anforderungen mit ihren Stärken und Schwächen gegenübergestellt.

2 Problem, Ziel und Nutzen des Forschungsvorhabens

Neue Standards, wie die EU-weit geltende EG-Tunnelrichtlinie [1], bzw. das in Folge der Vorgaben aus der EG-Tunnelrichtlinie angepasste nationale Regelwerk, die „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT), Ausgabe 2006 [2], schreiben in bestimmten Fällen Verfahren vor, mit deren Hilfe das Sicherheitsniveau von Tunneln anhand ihrer Merkmale und Ausstattung vergleichend gegenübergestellt werden kann. Weiterhin werden für Straßentunnel Risikoanalysen zur Ermittlung der Gleichwertigkeit technischer Lösungen als Alternative zu baulichen Anforderungen im Hinblick auf die Wahrung der Richtlinienkonformität gefordert.

Ein zu der Thematik „Risikobezogene Untersuchungen von Tunneln“ vom BMVBS bzw. von der BAST extern vergebenes Forschungsvorhaben hatte die Entwicklung einer Methodik zur Durchführung quantitativer Risikoanalysen für das System „Straßentunnel“ zum Inhalt [3].

Parallel zur Entwicklung einer Methodik für eine quantitative Risikoanalyse sind für ihre zeitnahe Anwendung die hierzu erforderlichen Daten bereitzustellen und zu aktualisieren. Der bei der BAST sowohl zu Brandfallszenarien als auch zu Ereignis-

und Versagenshäufigkeiten betriebstechnischer Ausstattungselemente vorliegende Datenumfang ist hierzu zu einem für eine Auswertung geeigneten Umfang zu ergänzen.

Aufgrund der Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie [1] und der hieraus abzuleitenden wachsenden Bedeutung von Risikoanalysen sind erhöhte Aktivitäten weiterer Mitgliedstaaten zu erwarten. Aus diesem Grund ist eine Beobachtung, Auswertung, Bewertung und Abstimmung auf europäischer Ebene sinnvoll. Ein Forum für diese Aktivitäten ist die durch das Technical Committee C 3.3 „Road Tunnel Operation“ von PIARC geschaffene Working Group (WG) 2 „Management of Road Tunnel Safety“ mit der Subgroup 2.2 „Risk Analysis“. Ein von der Gruppe zwischenzeitlich erstellter Berichtsentwurf fasst die derzeit vorhandenen Prinzipien und Anwendungen risikobezogener Methoden einzelner europäischer Länder für Straßentunnel zusammen [4].

Zur Darlegung eines aus deutscher Sicht anwendbaren risikobezogenen Untersuchungsverfahrens für Straßentunnel ist es erforderlich, eine erste Entwurfsfassung für einen Bericht nach Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie [1] mit folgenden Inhalten vorzubereiten:

- Anwendungsbereiche risikobezogener Untersuchungen,
- Definition wichtiger Bezeichnungen in Bezug auf risikobezogene Verfahren und Risikoermittlung,
- Darstellung risikobezogener Verfahren als Hilfsmittel zur Risikoermittlung und -darstellung in Straßentunneln,
- Beurteilung der Verfahren im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und der Berücksichtigung objektspezifischer Besonderheiten,
- Zusammenstellung praktischer Erfahrungen.

Ziel des Vorhabens ist es, einen aktuellen Zwischenstand der derzeitigen straßentunnelspezifischen risikobezogenen Untersuchungsverfahren in Bezug auf die an sie gestellten Vorgaben, ihre theoretischen Grundlagen als auch die aus ihrer Anwendung gewonnenen praktischen Erfahrungen darzustellen, um als Hilfestellung zur Beurteilung der Notwendigkeit und Anwendung von Risikoanalysen bzw. zur Interpretation der Ergebnisse von Risikoanalysen zu dienen.

3 Vorgaben an eine risikobezogene Untersuchungsmethodik für Straßentunnel

3.1 Allgemeines

Als Reaktion auf die Brandereignisse insbesondere im Mont-Blanc- und Tauern-Straßentunnel, wurden in zahlreichen europäischen Staaten sowie auf übergeordneter internationaler Ebene verstärkte Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Sicherheit in Straßentunneln unternommen. Insbesondere auf Normen- und Richtlinienenebene wurden aufgrund der Erkenntnisse aus den beiden Unfallereignissen und ergänzender Forschungsarbeiten zahlreiche Änderungen und Neuerungen vorgenommen. Nachfolgend sind die derzeitigen normativen Vorgaben und methodischen Anforderungen an eine risikobezogene Untersuchungsmethodik des Systems Straßentunnel zusammengestellt.

3.2 Vorgaben aus Regelwerken

Der Geltungsbereich der im Jahre 2004 auf EU-Ebene eingeführten EG-Tunnelrichtlinie [1] erstreckt sich auf geplante, in der Bauphase und in Betrieb befindliche Straßentunnel ab 500 m Länge innerhalb des Transeuropäischen Straßennetzes. In der Richtlinie werden neben den Forderungen nach klar definierten technischen und baulichen Maßnahmen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, auch Forderungen aufgestellt bzw. nach Möglichkeiten gesucht, den Einsatz von Sicherheitsmaßnahmen verstärkt an der objektspezifischen Risikosituation eines Tunnels zu orientieren.

Mit Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie wird ein als „Risikoanalyse“ bezeichnetes Untersuchungsverfahren für ein Tunnelbauwerk eingeführt, ohne jedoch die Art der Verfahrensdurchführung genauer zu spezifizieren. In Verbindung mit Anhang I der EG-Tunnelrichtlinie gehen bei der Beurteilung der Charakteristik einer Tunnelanlage verschiedene Parameter ein, um Risiken für einen bestimmten Tunnel unter Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanten planerischen und verkehrlichen Faktoren zu erfassen. Weist ein Tunnel hinsichtlich dieser Parameter Besonderheiten auf, ist eine Risikoanalyse durchzuführen. Hierdurch ist festzustellen, ob zur Sicherstellung eines hohen Sicherheitsniveaus ggf. über die Mindestanforderungen hinausgehende zu-

sätzliche Sicherheitsmaßnahmen für das betrachtete Tunnelbauwerk erforderlich sind.

Eine Risikoanalyse nach Artikel 13 EG-Tunnelrichtlinie ist in Verbindung mit Artikel 3 EG-Tunnelrichtlinie auch dann durchzuführen, wenn bestimmte, in Anhang I der EG-Tunnelrichtlinie festgelegte bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können, die nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten verwirklicht werden können. Die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu diesen Anforderungen kann akzeptiert werden, sofern diese Alternativmaßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau – nachzuweisen mittels o. g. Risikoanalyse – führen.

Aus diesen Vorgaben kann als Zielsetzung von Risikoanalysen einerseits abgeleitet werden, mit der Berücksichtigung tunnelspezifischer Randbedingungen eine größere Flexibilität bei der Zusammenstellung eines über den Mindeststandards liegenden Maßnahmenumfangs zu erhalten. Andererseits soll aber auch die Wirkung verschiedener Maßnahmen auf das Risiko sowie die Kosten einer Maßnahme und die daraus resultierende Risikominderung ermittelt werden können.

Die Umsetzung der EG-Tunnelrichtlinie in jeweiliges nationales Recht der Mitgliedstaaten wurde auf unterschiedliche Weise geregelt. Die dabei mögliche Bandbreite reicht von einer Ergänzung und Fortschreibung einer oder mehrerer Regelwerke (Deutschland – RABT [2], Straßenverkehrsordnung (StVO) [5], Verwaltungsverordnung zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO) [6]) bis hin zu der kompletten Umsetzung mittels (neuem) Gesetz (Öster-

reich – „Straßentunnelsicherheitsgesetzes“ (STSG) [7]).

Technische und risikoanalytische Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie sind in den RABT [2] umgesetzt worden. In deren Abschnitt 0.4 ist eine zusammenfassende Darstellung der die Sicherheit eines Tunnelbauwerkes beeinflussenden Parameter aufgenommen und im Vergleich zur EG-Tunnelrichtlinie um den Aspekt von unterirdischen Zu- und Abfahrten erweitert worden. In Abschnitt 0.5 wurde die Notwendigkeit der Durchführung einer „Risikoanalyse“ genannten Verfahrens grundsätzlich festgelegt. Der Geltungsbereich risikoanalytischer Vorgaben bezieht sich zunächst auf Tunnel des Bundesfernstraßennetzes ab 400 m Länge. Das Verfahren ist bei bestehenden Tunneln für den Nachweis eines gleichwertigen oder höheren Sicherheitsniveaus kompensatorischer Maßnahmen anzuwenden. Die Durchführung erfolgt in dem Fall, wenn festgelegte bauliche Anforderungen nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohen Kosten umsetzbar sind, und ihre Kompensationsmöglichkeit mittels anderer Maßnahmen zu prüfen ist. Im Abschnitt 4.3 der RABT sind für die Bemessung des Lüftungstechnischen Ausstattungsbedarfs im Brandfall ergänzende Risikoanalysen vorzusehen, ebenso wie für den im Abschnitt 9 behandelten Transport von Gefahrgut und vergleichbaren Gütern im Hinblick auf die Ermittlung des Risikos der Tunnelstrecke im Vergleich zu Alternativrouten. Der Wortlaut der für die Durchführung von Risikoanalysen maßgeblichen normativen Vorgaben, Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie und Abschnitt 0.5 der RABT sind in Tabelle 1 inhaltlich auszugsweise und vergleichend gegenübergestellt.

Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie	Abschnitt 0.5 der RABT 2006
<p>(1) ... In einer Risikoanalyse werden die Risiken für einen bestimmten Tunnel unter Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanten planerischen und verkehrlichen Faktoren untersucht, insbesondere Verkehrsmerkmale, Tunnellänge, Verkehrsart und Tunnelgeometrie sowie das prognostizierte tägliche Aufkommen an Schwerverkehr.</p> <p>(2) Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass auf nationaler Ebene eine präzise, genau definierte und optimaler Praxis entsprechende Methodik angewandt wird, und setzen die Kommission über die angewandte Methodik in Kenntnis, die ihrerseits diese Information den anderen Mitgliedstaaten in elektronischer Form zur Verfügung stellt.</p> <p>(3) Die Kommission veröffentlicht ... einen Bericht über die in den Mitgliedstaaten angewandte Praxis. Sie unterbreitet erforderlichenfalls Vorschläge zur Festlegung einer gemeinsamen harmonisierten Methodik für Risikoanalysen nach dem in Artikel 17 Absatz 2 genannten Verfahren.</p>	<p>Weist ein Tunnel ab 400 m Länge hinsichtlich der vorgenannten Parameter [Abschnitt 0.4] eine besondere Charakteristik auf, ist eine Risikoanalyse durchzuführen, um festzustellen, ob zur Gewährleistung der Sicherheit im Tunnel zusätzliche Maßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind, die über dem Standard der RABT liegen.</p> <p>....</p> <p>In einer Risikoanalyse werden die Risiken für einen bestimmten Tunnel unter Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanten planerischen und verkehrlichen Faktoren untersucht, wobei alle oben [in Abschnitt 0.4] aufgeführten Parameter zu berücksichtigen sind.</p> <p>....</p>

Tab. 1: Umsetzung des Artikels 13 „Risikoanalyse“ der EG-Tunnelrichtlinie in Abschnitt 0.5 „Risikoanalyse der RABT 2006“

Seit der Einführung der RABT 2006 hat die Anwendung der Vorgaben im Hinblick auf den Anlass einer Risikoanalyse als auch den in Abhängigkeit vom Anlass zu betreibenden Untersuchungsaufwand teilweise zu Unsicherheiten bei der Durchführung von Risikoanalysen geführt. Dies kann einerseits in der Wahl lediglich des Begriffs „Risikoanalyse“ zur Untersuchung inhaltlich unterschiedlicher Sachverhalte, andererseits auch in dem in den Regelwerken nicht erläuterten Vorgehen zur Durchführung des Verfahrens liegen.

Die in Tabelle 2 vorgenommene Zusammenstellung beinhaltet die risikobezogenen Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie und der RABT 2006. Mit ihrer Hilfe sollen diejenigen Sachverhalte identifiziert werden können, für die das Verfahren „Risikoanalyse“ gemäß Artikel 13/Abschnitt 0.5 vorzunehmen ist bzw. für die auch davon abweichende risikoorientierte Untersuchungsverfahren zur Anwendung kommen können. Danach ist eine „Risikoanalyse“ gemäß Abschnitt 0.5, ohne Berücksichtigung der Gefahrgutproblematik, in folgenden Fällen durchzuführen:

- bei einer „besonderen Charakteristik“ des Bauwerks,
- der Festlegung der Lüftungsart bei Gegenverkehrstunneln,
- im Bestand zum Nachweis der (Kosten-) Wirksamkeit kompensatorischer Maßnahmen.

In Anwendung stehende Normen und Richtlinien anderer Länder wurden im Hinblick auf die an Sicherheitsmaßnahmen in Straßentunneln gestellten Anforderungen ausgewertet [3]. Aus den Ergebnissen ist mehrheitlich eine nach dem Stand der Technik orientierte Ansatzweise abzuleiten, also die Umsetzung vorab festgelegter vorgegebener Maßnahmen bei der Erfüllung bestimmter Kriterien. Bei der Dimensionierung oder Festlegung von Anforderungen an die Ausgestaltung von Sicherheitsmaßnahmen gehen teilweise jedoch auch risikorelevante Einflüsse wie etwa das Verkehrsaufkommen oder die Tunnellänge ein. Basierend darauf können spezifisch vorzusehende Maßnahmenstandards (eingeteilt nach entsprechenden Klassen) abgeleitet werden. Ein nach der EG-Tunnelrichtlinie durchzu-

Risikoanalysen in der EG-Tunnelrichtlinie		Risikoanalysen in den RABT 2006	
gemäß Artikel 13	sonstige Risikoanalysen	gemäß Abschnitt 0.5	sonstige Risikoanalysen
<p>Art. 3, Abs. 2</p> <p>Wenn bestimmte, in Anhang I festgelegte bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können, die nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten verwirklicht werden können, kann die Verwaltungsbehörde im Sinne des Artikels 4 die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu diesen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Alternativmaßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird anhand einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 nachgewiesen. Die Mitgliedstaaten teilen der Kommission unter Angabe von Gründen mit, welche risikomindernden Alternativmaßnahmen sie akzeptieren. Tunnel, die sich in der Planungsphase gemäß Artikel 9 befinden, sind von den Bestimmungen dieses Absatzes ausgenommen.</p>		<p>Abschnitt 0.2</p> <p>... Abweichungen von den Richtlinien bedürfen einer Begründung, hierbei darf der in diesen Richtlinien beschriebene Sicherheitsstandard nicht unterschritten werden. Im Falle von bestehenden Tunneln ist Abschnitt 0.5 zu beachten</p> <p>Abschnitt 0.5</p> <p>Führen bauliche Anforderungen bei bestehenden Tunneln zu unverhältnismäßig hohen Kosten oder sind sie nicht umsetzbar, ist zu prüfen, inwieweit diese durch andere Maßnahmen kompensiert werden können. Die Verwaltungsbehörde (Abschnitt 1.1.1) kann die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu den baulichen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Maßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. Ihre Wirksamkeit wird anhand einer Risikoanalyse nachgewiesen.</p>	

Tab. 2: Risikobezogene Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie/der RABT 2006

Risikoanalysen in der EG-Tunnelrichtlinie		Risikoanalysen in den RABT 2006	
gemäß Artikel 13	sonstige Risikoanalysen	gemäß Abschnitt 0.5	sonstige Risikoanalysen
<p>Anhang I, Abschnitt 1.1.2/1.1.3</p> <p>Weist ein Tunnel hinsichtlich der genannten Parameter [Anhang I, Abschnitt 1.1.2] eine besondere Charakteristik auf, ist eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 durchzuführen, um festzustellen, ob zur Sicherstellung eines hohen Sicherheitsniveaus im Tunnel zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind. Bei dieser Risikoanalyse sind die beim Betrieb des Tunnels möglicherweise auftretenden Unfälle, die für die Sicherheit der Tunnelnutzer eindeutig von Belang sind, sowie Art und Umfang ihrer möglichen Folgen zu berücksichtigen.</p>		<p>Abschnitt 0.5</p> <p>Weist ein Tunnel ab 400 m Länge hinsichtlich der vorgeannten Parameter [Abschnitt 0.4] eine besondere Charakteristik auf, ist eine Risikoanalyse durchzuführen, um festzustellen, ob zur Gewährleistung der Sicherheit im Tunnel zusätzliche Maßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind, die über dem Standard der RABT liegen. In die Untersuchung werden Schadensszenarien, empirische Abschätzungen sowie statistisch erhobene Unfalldaten einbezogen.</p>	
	<p>Anhang I, Abschnitt 2.2.3</p> <p>In Tunneln mit einem Gefälle über 3 % sind ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.</p>		<p>Abschnitt 2.2</p> <p>In Tunneln ab einer Länge von 400 m sind bei einer Neigung über 3 %, ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen. Eine Neigung von 5 % soll vermieden werden.</p>
	<p>Anhang I, Abschnitt 2.2.3</p> <p>In Tunneln mit einem Gefälle über 3 % sind ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.</p>		<p>Abschnitt 2.2</p> <p>In Tunneln ab einer Länge von 400 m sind bei einer Neigung über 3 %, ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen. Eine Neigung von 5 % soll vermieden werden.</p>
	<p>Anhang I, Abschnitt 2.2.4</p> <p>Beträgt die Breite der Spur für langsam fahrende Fahrzeuge weniger als 3,5 m und ist Schwerverkehr zugelassen, so sind ausgehend von einer Risikoanalyse zusätzliche und/oder verstärkte Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu treffen.</p>	<p>Aufgrund des Regelwerks innerhalb des Bestandes nicht vorhanden.</p>	
	<p>Anhang I, Abschnitt 2.3.5</p> <p>Notausgänge sind dann vorzusehen, wenn eine Analyse der betreffenden Risiken einschließlich der Rauchbildungs- und -ausbreitungsgeschwindigkeit unter örtlichen Gegebenheiten zeigt, dass die Lüftung und andere Sicherheitsvorkehrungen nicht ausreichen, um die Sicherheit der Straßennutzer sicherzustellen.</p>		<p>Entweder durch Regelwerk oder durch Nachrüstungsmaßnahmen weist auch der Bestand entsprechende Sicherheitsvorkehrungen auf.</p>

Tab. 2: Fortsetzung

Risikoanalysen in der EG-Tunnelrichtlinie		Risikoanalysen in den RABT 2006	
gemäß Artikel 13	sonstige Risikoanalysen	gemäß Abschnitt 0.5	sonstige Risikoanalysen
	<p>Anhang I, Abschnitt 2.6.2</p> <p>Entwässerung: Können diese Anforderungen in einem bestehenden Tunnel nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten erfüllt werden, so ist dies ausgehend von einer Analyse der relevanten Risiken bei der Entscheidung über die Genehmigung des Gefahrguttransports zu berücksichtigen.</p>	<p>Abschnitt 0.5</p> <p>....</p> <p>Darüber hinaus sind mit einer Risikoanalyse zu belegen:</p> <p>-....</p> <p>-Zulässigkeit von Gefahrguttransporten, s. Abschnitt 9</p>	
<p>Anhang I, Abschnitt 2.9.3</p> <p>Lüftung: In Tunneln mit Gegenverkehr und/oder stockendem Richtungsverkehr dürfen Längslüftungssysteme nur verwendet werden, wenn eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 zeigt, dass dies annehmbar ist und/oder spezielle Maßnahmen, beispielsweise angemessene Verkehrssteuerung, kürzere Abstände zwischen den Notausgängen, Rauchabsaugung in regelmäßigen Abständen, getroffen werden.</p>		<p>Abschnitt 4.3.3</p> <p>Tabelle 9a: Lüftungsarten im Brandfall bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit täglich stockendem Verkehr</p>	
<p>Anhang I, Abschnitt 3.4</p> <p>... Bei größeren Gegenverkehrstunneln mit hohem Verkehrsaufkommen ist im Rahmen einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 zu ermitteln, ob die Stationierung von Einsatzdiensten an den beiden Tunnelportalen erforderlich ist.</p>		<p>Abschnitt 5.4</p> <p>Tabelle 11: Steuerungsmaßnahmen für verschiedene Stör-/Notfälle in Abhängigkeit von der Tunnelausstattung</p> <p>-----</p> <p>Regelungen erfolgen im Rahmen der Organisationshoheit der Bundesländer.</p>	
<p>Anhang I, Abschnitt 3.7</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vor der Festlegung oder Änderung von Vorschriften und Anforderungen für den Gefahrguttransport durch einen Tunnel ist eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 durchzuführen. • Im Einzelfall sind im Anschluss an die genannte Risikoanalyse spezielle betriebliche Maßnahmen zur Verringerung der Risiken für bestimmte oder alle Gefahrgutfahrzeuge in Tunneln zu prüfen, z. B. Meldung vor der Einfahrt oder Durchfahrt in Konvois mit Begleitfahrzeugen. 		<p>Abschnitt 9</p> <p>...</p> <p>Vor der Festlegung oder Änderung von Vorschriften und Anforderungen für den Gefahrguttransport durch einen Tunnel ist eine Risikoanalyse gemäß Abschnitt 0.5 für Tunnel ab 400 m Länge durchzuführen.</p> <p>Soweit Alternativrouten für den Transport von Gefahrgütern oder gegebenenfalls auch vergleichbarer Beladungen zur Verfügung stehen, sind sie in eine Risikoanalyse mit aufzunehmen.</p> <p>Die Ergebnisse können dazu führen, dass durch zusätzliche bauliche, technische und/oder organisatorische Maßnahmen Eintrittswahrscheinlichkeiten reduziert und/oder Ausmaße von Störfällen begrenzt werden können.</p>	

Tab. 2: Fortsetzung

Risikoanalysen in der EG-Tunnelrichtlinie		Risikoanalysen in den RABT 2006	
gemäß Artikel 13	sonstige Risikoanalysen	gemäß Abschnitt 0.5	sonstige Risikoanalysen
	Anhang I, Abschnitt 3.8 Aufgrund einer Risikoanalyse ist zu entscheiden, ob Schwerverkehr in Tunneln mit mehr als einem Fahrstreifen in jeder Richtung das Überholen erlaubt werden sollte.		Abschnitt 5.2 ... Die Wahl der geeigneten Ausstattung soll auf der Basis des Bildes 12 unter Berücksichtigung einer gegebenenfalls erstellten Risikoanalyse erfolgen....
Anhang II, Abschnitt 2.3 Für einen in der Planung befindlichen Tunnel umfasst die Sicherheitsdokumentation insbesondere folgende Bestandteile: -... - eine Verkehrsprognose unter Darlegung und Begründung der erwarteten Bedingungen für die Beförderung von Gefahrgut, zusammen mit der Risikoanalyse gemäß Anhang I Abschnitt 3.7 -...	Abschnitt 1.1.5 ... a) Für einen in der Planung befindlichen Tunnel umfasst die Sicherheitsdokumentation insbesondere folgende Bestandteile: - die zur Darstellung des Gesamtsicherheitskonzeptes nach dem Abschnitt 0.4 sowie gegebenenfalls der Risikoanalyse nach dem Abschnitt 0.5 erforderlichen Unterlagen -...		

Tab. 2: Fortsetzung

führender Nachweis über die Gleichwertigkeit verschiedener Sicherheitsmaßnahmen ist derzeit außer in den RABT [2] in keinem der in [3] untersuchten anderen Regelwerken enthalten.

3.3 Methodische Anforderungen

Die methodischen Anforderungen zur Durchführung einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie gehen sowohl aus den RABT als auch aus ausgewerteten Normen und Richtlinien anderer Länder hervor [3]. Die Hinweise beziehen sich auf praxisorientierte Abschätzungen anhand einfacher Berechnungsverfahren oder auf vertiefende risikobezogene Untersuchungsverfahren. Methodikbezogene Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie und der RABT sind in Tabelle 3 vergleichend gegenübergestellt.

Auch wenn es sich hierbei um lediglich vereinzelt gegebene methodische Hinweise handelt, lässt sich eine Tendenz hin zu denjenigen methodischen Ansätzen erkennen, die eine transparente Ergebnisdarstellung durch definierte Berechnungsabläufe oder die Nachbildung szenariogestützter Ereignisabläufe leisten können. Von denen in Abschnitt 4 und Anhang 2 des vorliegenden Berichtes darge-

stellten Modellen und Methodikbausteinen zur Durchführung von risikobezogenen Untersuchungen sind hierzu bevorzugt die unter den quantitativen Methoden aufgeführten Verfahren in der Lage.

Neben allgemeinen Hinweisen zur Durchführung von Risikoanalysen (siehe Tabelle 3) (Abschnitt 0.5/Abschnitt 9 der RABT) gehen aus der Gegenüberstellung der Kosten einer Maßnahme und der daraus resultierenden Risikominderung als so genannter Kosten-Wirksamkeit (Abschnitt 0.5 der RABT) einerseits sowie der Ermittlung der Wirkung verschiedener Maßnahmen (Abschnitt 0.5/Abschnitt 4.3.2 der RABT) als so genanntem Sicherheitsnachweis andererseits zwei weitere methodische Richtungen hervor.

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 (Artikel 3, Abs. 2 EG-Tunnelrichtlinie). Werden, z. B. aus Kostengründen oder beim geplanten Einsatz neuer Technologien, nicht alle Forderungen richtlinienkonform umgesetzt, so sind andere Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen, mit welchen

EG-Tunnelrichtlinie	RABT 2006
	<p>Abschnitt 0.5</p> <p>....</p> <p>In die Untersuchung werden Schadensszenarien, empirische Abschätzungen sowie statistisch erhobene Unfalldaten einbezogen.</p> <p>Abschnitt 9</p> <p>... Hilfestellungen zur Untersuchungsmethodik für eine Entscheidung über mögliche Einschränkungen von Gefahrguttransporten oder von Transporten mit vergleichbaren Beladungen in Straßentunneln gibt das gemeinsame OECD/PIARC Projekt ERS [12] und in Teilen die Schweizer Störfallverordnung [13].</p>
<p><i>Zur Berücksichtigung der an eine Risikoanalyse gestellten Anforderungen kann abgeleitet werden, von den im Abschnitt 4 bzw. Anhang 2 des vorliegenden Berichtes zusammengestellten Methodikbausteine bevorzugt Methoden zur Ermittlung von Risikowerten einzubeziehen.</i></p>	
<p>Artikel 3, Abs. 2</p> <p>... die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu diesen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Alternativen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. ...</p> <p>Artikel 14, Abs. 1</p> <p>Die Verwaltungsbehörde kann auf einen ordnungsgemäß dokumentierten Antrag des Tunnelmanagers hin Ausnahmen von den Anforderungen dieser Richtlinie gewähren, um den Einbau und die Verwendung innovativer Sicherheitseinrichtungen oder die Verwendung innovativer Sicherheitsverfahren zu ermöglichen, die im Vergleich zum heutigen Stand der Technik, der den Vorgaben dieser Richtlinie zugrunde liegt, einen gleichwertigen oder höheren Schutz bieten.</p>	<p>Abschnitt 0.5</p> <p>... kann die Durchführung risikomindernder Maßnahmen als Alternative zu den baulichen Anforderungen akzeptieren, sofern diese Maßnahmen zu einem gleichwertigen oder höheren Schutzniveau führen. ...</p> <p>Abschnitt 1.1.8</p> <p>Die Verwaltungsbehörde kann auf Antrag des Tunnelmanagers hin Ausnahmen von den Anforderungen dieser Richtlinie gewähren, um den Einbau und die Verwendung innovativer Sicherheitseinrichtungen oder die Verwendung innovativer Sicherheitsverfahren zu ermöglichen, die im Vergleich zum heutigen Stand der Technik, der den Vorgaben dieser Richtlinie zugrunde liegt, einen gleichwertigen oder höheren Schutz bieten.</p>
<p><i>Zur Ermittlung der Wirkung verschiedener Maßnahmen auf das Risiko kann im Sinne der in Abschnitt 4 bzw. Anhang 2 des vorliegenden Berichtes zusammengestellten Methodikbausteine über einen Vergleich von Risikowerten gefolgert werden, dass für einen Tunnel mit den Abweichungen von den normativen Vorgaben unter Berücksichtigung der kompensierenden technischen Maßnahmen (Nachweiszustand) mindestens ein gleichwertiges oder höheres Schutzniveau erreicht wird, wie für einen Tunnel bei vollständiger Umsetzung der Vorgaben des Regelwerkes (Referenzzustand). Der Vergleich der Risikowerte von Nachweiszustand und Referenzzustand kann dann als so genannter Sicherheitsnachweis dargestellt werden.</i></p>	
<p>Artikel 3, Abs. 2</p> <p>Wenn ... bauliche Anforderungen nur durch technische Lösungen erfüllt werden können, die nicht oder nur zu unverhältnismäßig hohen Kosten verwirklicht werden können. ...</p> <p>Artikel 3, Abs. 2 ...</p> <p>Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen wird anhand einer Risikoanalyse gemäß Artikel 13 nachgewiesen. ...</p>	<p>Abschnitt 0.5</p> <p>Führen bauliche Anforderungen bei bestehenden Tunneln zu unverhältnismäßig hohen Kosten oder sind sie nicht umsetzbar, ist zu prüfen, inwieweit diese durch andere Maßnahmen kompensiert werden können.</p> <p>Abschnitt 0.5</p> <p>Ihre Wirksamkeit wird anhand einer Risikoanalyse nachgewiesen.</p> <p>Abschnitt 4.3.2</p> <p>... Daher sind im Einzelfall Kosten-Risiko-Abwägungen und gegebenenfalls Sonderregelungen zu treffen, um eine technisch machbare und kostenmäßig vertretbare Lösung zu erreichen.</p>
<p><i>Zum Vergleich der Kosten einer Maßnahme und die aus der Maßnahme resultierende Risikominderung kann die Einbeziehung derjenigen in Abschnitt 4 bzw. Anhang 2 des vorliegenden Berichtes aufgezeigten Methodikbausteine abgeleitet werden, die die Aspekte der Kosten-Wirksamkeit berücksichtigen.</i></p>	

Tab. 3: Methodikbezogene Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie/der RABT 2006

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, Bild 1.

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

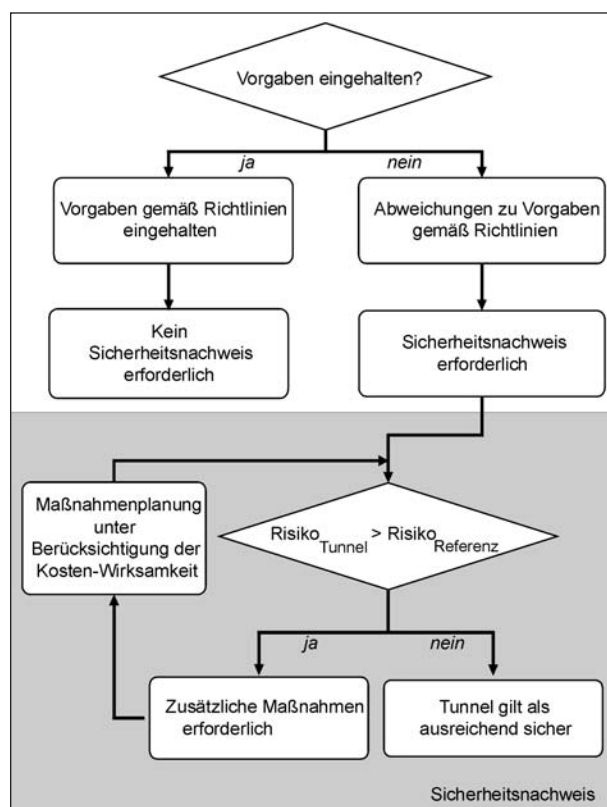


Bild 1: Prinzip des Sicherheitsnachweises [3]

berücksichtigen, um die Verhältnismäßigkeit der eingesetzten Mittel zu gewährleisten.

4 Risikobezogene Untersuchungsmethoden und Verfahren

4.1 Allgemeines

Risikobezogene Verfahren sind ursprünglich zur Ermittlung der Sicherheit von potentiell gefährlichen industriellen Prozessen (z. B. in der chemischen Industrie) oder Industrieanlagen (wie Kernkraftwerken) entwickelt worden. Diese aktive Sicherheitsstrategie, die auf einer systematischen Untersuchung aller möglichen Gefahren beruht, soll die lediglich auf Erfahrungen aus Un- oder Störfällen basierenden Konzepte ersetzen. In den letzten 15 Jahren sind einige risikobezogene Methoden aus dem industriellen Bereich auf ihre Anwendbarkeit auch im Bereich Mobilität und Verkehr betrachtet worden. Als spezieller Einsatzbereich stellt sich hierbei die Untersuchung der Sicherheit in Straßentunneln dar.

Allgemein handeln risikobezogene Untersuchungen von zukünftigen möglichen negativen Konsequenzen

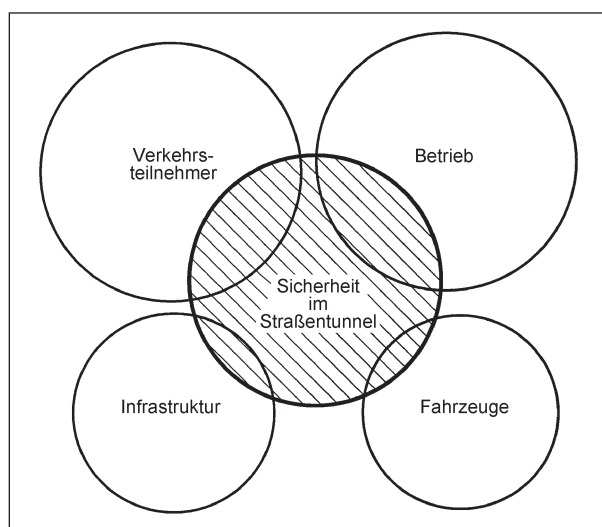


Bild 2: Sicherheit im Straßentunnel – ganzheitliche Betrachtung

zen eines technischen Systems. Da niemand in der Lage ist, zukünftige Ereignisse vorherzusagen, besteht eine Lösungsmöglichkeit darin – so realistisch wie möglich – aus dem System erwachsende Risiken in einem Modell darzustellen. Da negative Konsequenzen von ihrer Anzahl grundsätzlich gegen unendlich streben können, wird es unvermeidlich sein, jede Untersuchung auf eine begrenzte Anzahl repräsentativer auslösender Ereignisse und daraus folgender Ereignisabläufe zu beschränken. Durch eine Begrenzung ist es andererseits nicht auszuschließen, dass wichtige Szenarien nicht berücksichtigt bzw. berücksichtigte Szenarien in ihrer Bedeutung übergewichtet werden. Bei der Durchführung risikobezogener Untersuchungen sollte immer klar sein, dass jede Art von Risikoanalyse unabhängig von der zu Grundlegenden Methodik eine Vereinfachung in Folge gesetzter Vorbedingungen und Annahmen darstellt und kein exaktes Abbild der Wirklichkeit ist. Gleichwohl liefern risikobezogene Untersuchungen ein wesentlich besseres Verständnis risikobezogener Prozesse, als erfahrungsbasierte Konzepte, siehe Abschnitt 4.3, hierzu in der Lage wären [4].

Das Grundprinzip aller risikobezogenen Ansätze für Straßentunnel besteht in einer ganzheitlichen Betrachtung des Systems Straßentunnel mit Infrastruktur, Fahrzeugen, Tunnelbetrieb und Tunnelnutzern (Bild 2).

4.2 Begriffe

Die Durchführung von Risikoanalysen wird bei bestimmten Bedingungen durch die EG-Tunnelrichtlinie [1] als Hilfsmittel zur Überprüfung der Tunnelsi-

cherheit im Bereich des Transeuropäischen Straßennetzes gefordert. Risikobezogene Untersuchungen und Bewertungen entsprechend der Richtlinie werden sowohl von betroffenen Mitgliedstaaten als auch Nichtmitgliedstaaten bereits durchgeführt bzw. werden zukünftig erfolgen. Im Hinblick auf die verstärkte Anwendung risikobezogener Untersuchungen ist eine länderübergreifende Vereinheitlichung der Terminologie im Bereich Tunnelbau und -betrieb anzustreben. Allgemeine Grundsätze bzw. Begriffe im Rahmen der Durchführung risikobezogener Untersuchungen sind in Abschnitt 4.3 und im Anhang 1 (Glossar) zusammengestellt. Sie basieren sowohl auf bereits vorhandenen nationalen als auch internationalen Normen [3], [4].

4.3 Methodische Grundlagen

4.3.1 Allgemeines

Nachfolgend wird auf die wichtigsten Aspekte und Methoden, die im Zusammenhang mit der Durchführung risikobezogener Untersuchungen stehen, eingegangen. Eine Unterscheidungsmöglichkeit vorhandener Methoden ist hinsichtlich qualitativer und quantitativer Methoden möglich. Mit den Methoden korrespondierende Verfahren hinsichtlich Ermittlung, Auswertung und Bewertung von Daten werden nach empirischen, maßnahmenorientierten und risikoorientierten Ansätzen differenziert. Bild 3 zeigt eine grafische Übersicht der Methoden und Ansätze, auf die einzelnen Methodikbausteine wird vertiefend in Anhang 2 eingegangen.

4.3.2 Qualitative Methoden

Qualitative Methoden zeichnen sich durch eine relativ übersichtliche Verfahrensdarstellung und einen begrenzten Datenerhebungsaufwand aus. Durch das Aufstellen und Abarbeiten von Daten nach willkürlich gewählten Auswahl- und Auswertestandards kann eine rasche Identifizierung und ggf. auch eine Klassifizierung vorgenommen werden. Mögliche Wechselwirkungen bzw. Abhängigkeiten zwischen einzelnen Parametern wie beispielsweise zwischen baulichen und technischen Sicherheitsmaßnahmen, können durch das Verfahren hingegen ebenso wenig abgeschätzt werden, wie eine Übererfüllung einzelner Anforderungen. Als Beispiele hierzu sind die tendenzielle Verminderung der Sicherheit bei steigender Komplexität einer Anlage aufgrund steigender Abhängigkeiten zwischen

einzelnen Komponenten oder die subjektive Einschätzung einer höheren Sicherheit in Abhängigkeit von der erfüllten Anzahl von Anforderungen zu nennen.

Qualitative Methoden stützen sich im Hinblick auf die Erfassung, Auswertung und Bewertung von Daten häufig auf einem empirischen Ansatz ab. Dieser beruht vielfach auf dem Prinzip von „Versuch und Irrtum“. Die Entwicklung eines sicheren Systems erfolgt dabei mehr oder weniger kontinuierlich auf der Basis der laufenden und wachsenden Erfahrung bei der Benutzung. Die aus Fehlern, Störungen und Unfällen gewonnenen Erkenntnisse werden jeweils in neue Sicherheitsvorkehrungen umgesetzt. Unfälle spielen dabei eine besondere Rolle, da sie Anlass für bedeutende Weiterentwicklungen bezüglich Sicherheit mit den entsprechend erforderlichen Aufwendungen sind. Der empirische Ansatz ist überall dort sinnvoll, wo vergleichsweise häufig Ereignisse mit kleinen Schadenwirkungen die nötige Erfahrung für Verbesserungen liefern und nur wenige Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Parametern vorliegen.

Im Gegensatz zum empirischen Ansatz, der relativ eindeutig den qualitativen Methoden zugeordnet werden kann, ist dies beim maßnahmenorientierten Ansatz weniger eindeutig. Ein qualitativ-maßnahmenorientierter Ansatz kann in der Ableitung von Schlussfolgerungen hinsichtlich einer sicheren Gestaltung bestehen, bevor sich durch z. B. Unfallereignisse der Druck nach entsprechenden Maßnahmen von anderer Seite ergibt. Qualitativ kann dies maßnahmenorientiert durch den Vergleich des Systems entweder mit dem für das System geltenden Stand der Technik oder definierten Vorgaben und Normen mit aufgezählten zur Verfügung stehenden Sicherheitsmaßnahmen erfolgen.

4.3.3 Quantitative Methoden

Quantitative Methoden versuchen mögliche Ereignisse bzw. Ereignisketten innerhalb eines Systems in einer logischen zusammenhängenden Weise von einem Anfangszustand über verschiedene Zwischenzustände bis hin zu einem stabilen Endzustand abzubilden und die jeweiligen maßgeblichen Einflüsse auf den Ereignisablauf zu ermitteln. Für jeden Ereignisablauf wird dessen Häufigkeit und/oder dessen Ausmaß abgeschätzt. Diese quantitativen Größen, die die Entwicklung eines speziellen Zustands beschreiben, werden ermittelt und das dazugehörige Risiko bestimmt. Die An-

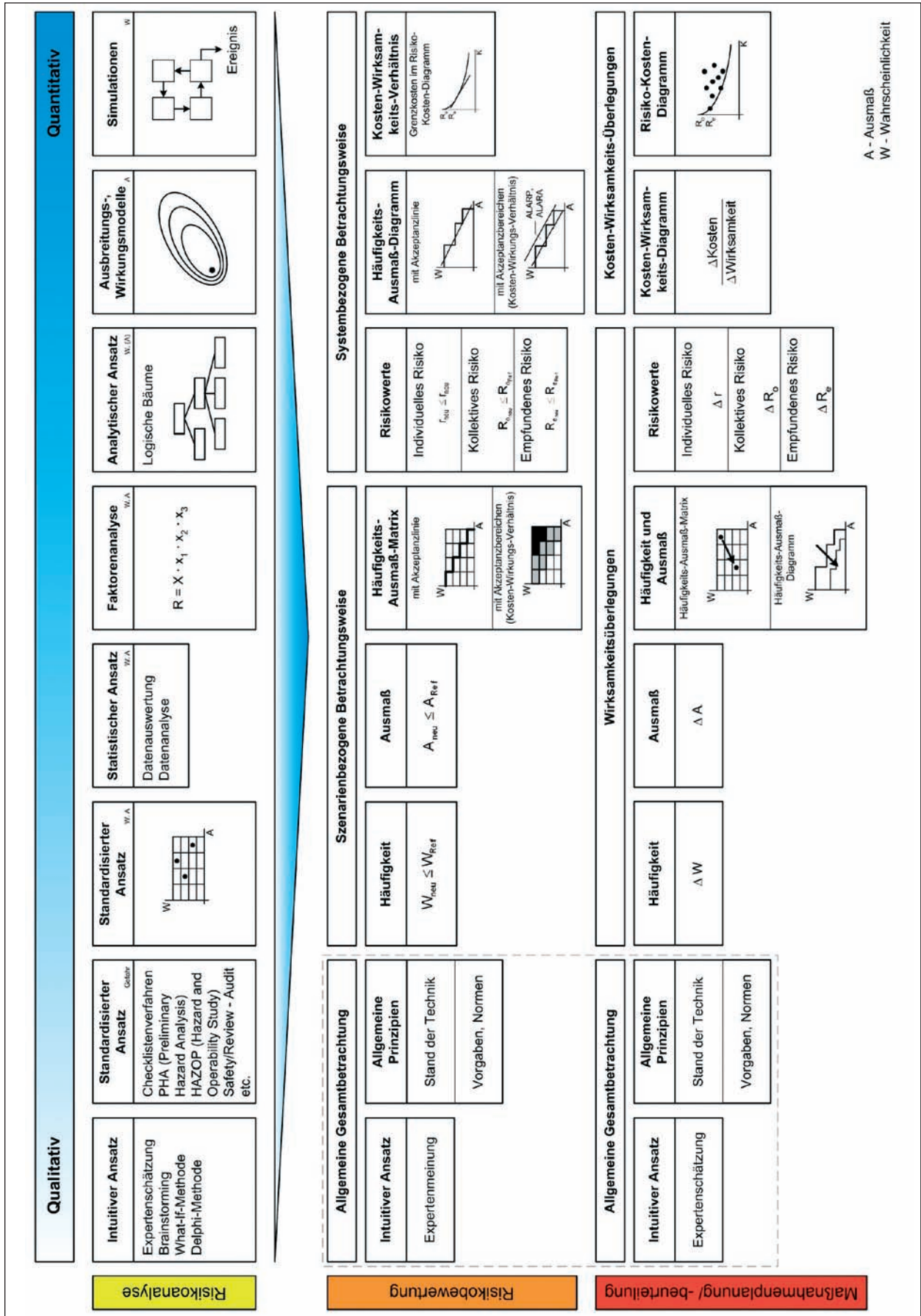


Bild 3: Quantitative und qualitative Methoden für risikobezogene Untersuchungen, nach [3]

Sz.	Ereigniskategorie	Involvierte Fahrzeuge bzw. Substanzen/Objekte	Schweregrad 1	Schweregrad 2	Schweregrad 3	Schweregrad 4
1	Panne	Pkw	Panne in Pannbucht	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 Auffahrkollision	Schwere Frontal- und Auffahrkollision
8	Brand (ohne Gefahrgüter 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	Ereignis mit Beteiligung oder Freisetzung von Gefahrgütern gemäß ADR	Feste (Stoffe) Expolivstoffe)	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, Starkniederschlag, Sturm etc.)	Brand außerhalb des Tunnels mit Rauchgasausbreitung in den Tunnel	Explosion/Freisetzung toxischer Gase außerhalb Tunnel	Überflutung des Tunnels

Bild 4: Szenarienentwicklung bei verschiedenen Initialereignissen und Schweregraden [3]

wendung quantitativer Methoden ermöglicht somit die nachvollziehbare Ermittlung eines bestimmten Risikos, wodurch ein besseres Verständnis auch komplizierter Wechselbeziehungen erreicht werden kann. Andererseits kann bei der Komplexität mancher Fragestellungen die Anwendung einer quantitativen Methodik unter dem Gesichtspunkt eines vertretbaren Mitteleinsatzes genauso in Frage gestellt sein, wie aufgrund einer zu schmalen Datenbasis, durch die eine quantitative Ermittlung maßgeblicher Einflussfaktoren verhindert wird. Quantitative Untersuchungen zeichnen sich häufig durch einen höheren Grad an Komplexität aus, wodurch sie weniger eingängig und handhabbar erscheinen.

Im Gegensatz zum qualitativen maßnahmenorientierten Ansatz sollte auf quantitativer Basis u. a. die Frage beantwortet werden können, ob bei mehreren zur Verfügung stehenden Sicherheitsmaßnahmen eine Wahl zwischen Alternativen möglich ist, oder ob auch bei Abweichungen von den Vorgaben die vorgegebenen Sicherheitsstandards noch erfüllt sind. Auch die Ermittlung des Umfangs bzw. Optimierung der Sicherheitsplanung im Hinblick auf die Kostenwirksamkeit einzelner Maßnahmen kann ausschließlich mit einem quantitativen maßnahmenorientierten Ansatz vorgenommen werden.

Den quantitativen Methoden sind neben Teilbereichen maßnahmeorientierter Ansätze auch die risi-

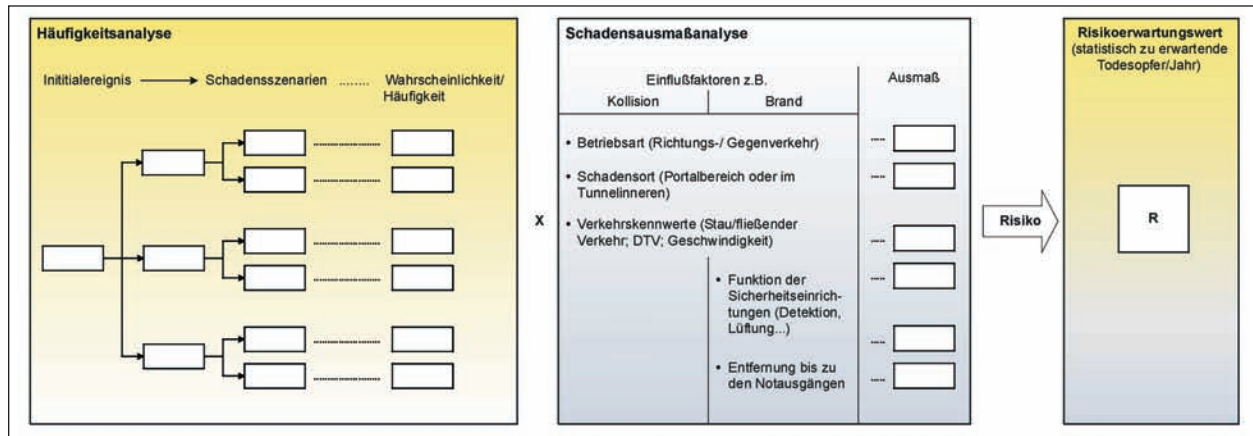


Bild 5: Prinzipielle Ermittlung eines Risikowertungswertes

koorientierten Untersuchungsansätze zuzuordnen. Diese sind vom Prinzip her wiederum in szenario- bzw. systembasierte Untersuchungsansätze zu differenzieren.

Beim szenariobasierten Untersuchungsansatz werden eine Anzahl realistischer Ereignisabläufe definiert, Bild 4, deren jeweilige Wahrscheinlichkeiten abgeschätzt und mögliche Konsequenzen aufgezeigt.

Die Risikoermittlung erfolgt für jedes einzelne Szenario auf der Basis seiner charakteristischen Einflussgrößen wie Häufigkeit des Eintritts, oder über die Folgen des Szenarios. Eine typische Anwendung einer szenariobasierten Untersuchung könnte die Optimierung der Gestaltung von Fluchwegen und Notausgängen sein. Szenariobasierte Anwendungen lassen eine ausführliche Untersuchung eines spezifischen Problems einschließlich von Wechselbeziehungen zwischen verschiedenen Effekten, ohne die Notwendigkeit jeden einzelnen beeinflussenden Parameter quantitativ bestimmen zu müssen, zu.

Bei Anwendung eines systembasierten Untersuchungsansatzes werden Risikowerte für ein Gesamtsystem ermittelt. Es werden alle Ereignisse/Szenarien, die einen Einfluss auf die Personensicherheit haben können sowie ihre jeweiligen Ausmaße einbezogen.

Das Risiko ist darstellbar in Form der durchschnittlichen Anzahl betroffener Personen pro Jahr, bezeichnet als Risikowertungswert, Bild 5, bzw. als soziales/kollektives Risiko, darstellbar als Kurve (Grenzkurve) innerhalb einer Häufigkeits-/Ausmaßverteilung, Bild 6. Aufgrund der Verwendung einer doppelt logarithmischen Skalierung des Dia-

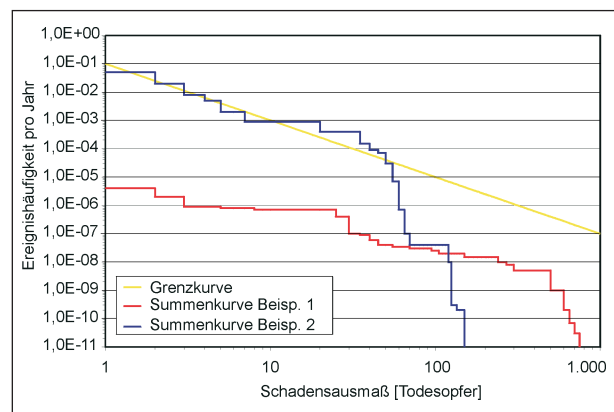


Bild 6: Beispiel eines Häufigkeits-Ausmaßdiagramms mit Summenkurven und Grenzkurve

gramms erfolgt die Darstellung der Grenzkurve als Gerade (Grenzkurve in Bild 6).

Eine Risikobeurteilung für das vollständige System ist auf mehrere Arten möglich:

- als absoluter Vergleich von einem für das System ermittelten Risikowertungswertes mit einem vorgegebenen festgelegten Wert,
- als relativer Vergleich der als Summenkurvenverläufe (Summenkurve Beisp. 1 und 2 in Bild 6) dargestellten Risiken innerhalb des Systems als Resultat der unterschiedlichen getroffenen Maßnahmen,
- als absoluter Vergleich zwischen den Summenkurven und einer vorgegebenen absoluten oberen Risikogrenze (Grenzkurve in Bild 6).

4.4 Anwendung

4.4.1 Methoden und Ansätze

Die jeweilige Methodik bzw. der jeweilige Untersuchungsansatz kann für jeden der in Bild 3 genannten Schritte von Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung spezifiziert werden.

Bei der Risikoanalyse ist die Kombination quantitativer und qualitativer Methoden aufgrund der in vielen Fällen nur schmalen Datenbasis, siehe Abschnitt 4.4.2, angebracht. Die Wahl der Methode für die Risikobewertung wird sich eng an die in der Risikoanalyse angewendeten Methodik anlehnen.

Zur Ermittlung der Risikominderung aufgrund zusätzlicher bzw. alternativer Maßnahmen sollten die gleichen Methoden wie für die Risikoanalyse und Risikobewertung verwendet werden. Die Auswirkungen zusätzlicher bzw. alternativer Sicherheitsmaßnahmen bei Integration in das jeweilige Szenario bzw. System sind hierdurch ermittelbar und können ausgewertet werden.

Ein durchgängiges und konsistentes Verfahren zur Ermittlung und Beurteilung von Risiken ist in der Kombination der Methoden für Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung möglich. Da andererseits bestimmte Auswerteverfahren nur auf den Ergebnissen bestimmter vorher durchgeführter Verfahren aufbauen können, ist eine willkürliche Kombination von Methoden und Verfahren untereinander nicht bzw. nur eingeschränkt möglich.

Die Auswahl geeigneter Verfahren für eine objektspezifische risikobezogene Untersuchung hängt von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab. Ausgehend von der Frage, welcher Sachverhalt durch die Untersuchung geklärt werden soll, sind weiterhin die Eigenschaften des Bauwerks, etwaige Besonderheiten sowie ergänzende Daten in die Untersuchung einzubeziehen.

Einfache qualitative Methoden, wie z. B. Expertenmeinungen, unterscheiden oftmals nur unzureichend zwischen Risikoanalyse und Risikobewertung und sind daher für eine Anwendung bei vielschichtigeren Sachverhalten kaum geeignet. Andererseits sind solche Methoden häufig unentbehrlich bei der Durchführung umfangreicherer Verfahren insbesondere zur Ergänzung einer zu schmalen Datenbasis.

Bei weiter ansteigender Komplexität der Systeme werden bevorzugt quantitative Methoden wie Fehler- oder Ereignisbaumanalysen, Ursachen-Folgenanalysen und Simulationen (z. B. Einfluss der Rauchverteilung und Abstand der Notausgänge auf die Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer bei einem Brand) für eine umfassende Darstellung möglicher Ereignisse und deren Folgen verwendet. Aufgrund des mit dieser Darstellungsweise verbundenen Aufwands ist die Konzentration auf die wichtigsten und quantifizierbaren Einflussgrößen anzustreben, ggf. auch mit einem Verlust an objektspezifischer Information. Viele quantitative Verfahren stützen sich auf Statistiken, oft in Verbindung mit Expertenmeinungen, um Defizite von Datenbanken auszugleichen. Während für szenariobasierte Ansätze sowohl qualitative oder quantitative Methoden als auch Kombinationen aus beiden verwendet werden können, werden für systembasierte Verfahren ausschließlich quantitative Methoden als zielführend gesehen [4].

Methodische Ansätze zur Durchführung risikobezogener Untersuchungen liegen auch für Straßentunnel vor. Eine Zusammenstellung über verfügbare Methoden und Modelle ist bereits im Rahmen des thematischen Netzwerkes für Sicherheit in Tunneln SafeT [11] vorgenommen worden, siehe Bild 7.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Auswertung sind [3]:

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

4.4.2 Datenerhebung

Grundlage der Anwendung risikobezogener Methoden und Ansätze sind Daten entsprechenden Umfangs und entsprechender Güte, die in Form von

Methode	Qualitativ oder quantitativ?	Methode oder Modell?	Unfalltypen							Untersuchungs-schwerpunkt					Anwend-barkeit					
			Verkehrsstörungen ohne Unfall	Zusammenstoß	Feuer	Explosion	Freisetzung von aggressivem oder toxischen Material	natürliche (Erdbeben, Überschwemmung)	Unfälle bei Unterwassertunneln (Ankerwurf, gesunkene Schiffe)	Risikoerkennung	Häufigkeitsberechnungen	physische Wirkungen	Schäden	Evakuierung		Wirtschaftlichkeit				
Risikoerkennung																				
Checklistenverfahren	Qualitativ/ Quantitativ	Methode	allgemein anwendbare Methoden							✓						***				
Ursachenermittlung	Quantitativ	Methode								✓										***
Fehlerbaumanalyse (FTA)	Qualitativ/ Quantitativ	Methode								✓	✓									***
Ereignisbaumanalyse (ETA)	Qualitativ/ Quantitativ	Methode									✓	✓	✓							***
Ursachen-Wirkungs-Analyse	Qualitativ	Methode								✓										*
What-if Methode	Qualitativ	Methode								✓										*
Gefährdungs-Durchführbarkeitsstudie (HAZOP)	Qualitativ	Methode								✓										*
Ausfallmodi-, Wirkungs- und Kritizitätsuntersuchung (FMECA)	Qualitativ	Methode								✓										*
Maßnahmenorientierte Risikoanalyse																				
Größter anzunehmender Unfall - Analyse (MCA)	Quantitativ	Methode	allgemein anwendbare Methoden												***					
Niederländische Szenarienanalyse für Straßentunnel	Qualitativ/ Quantitativ	Methode	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		**						
TNO- Ausmaßermittlungsmodell	Quantitativ	Modell			✓					✓	✓	✓		**						
SIMULEX	Quantitativ	Modell		✓		✓						✓		**						
Wahrscheinlichkeitsorientierte Risikoanalyse																				
Fehlerbaumuntersuchung (FTA)	Quantitativ	Methode	allgemein anwendbare Methoden							✓	✓									
Ereignisbaumuntersuchung (ETA)	Quantitativ	Methode									✓	✓	✓							
Quantitatives Risikoanalysemodell (QRAM)	Quantitativ	Methode			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		**						
TUSI (Tunnel Safety in Norway) - Modell	Quantitativ	Modell	✓	✓	✓				✓					*						
Quant. Risikoanalyse (QRA) Verfahren von Persson	Quantitativ	Methode			✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	*						
TunPRIM	Quantitativ	Modell	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓		*						
TNO-Eintrittswahrscheinlichkeitsmodell	Quantitativ	Modell			✓				✓	✓	✓	✓		**						

Bild 7: Methoden/Modelle zu risikobezogenen Untersuchungen für Straßentunnel, nach [11]

relativen Vergleichen, als Zahlenwerte oder in Kombinationen von beiden benötigt werden.

Im Gegensatz zu Unfällen auf der freien Strecke liegen zu Ereignissen in Straßentunneln vergleichsweise wenige Daten bzw. statistische Auswertungen vor. Dies schließt auch Brände in Straßentunneln ein. Bei einem Vergleich von Statistiken ist das zugrundeliegende Sicherheitsniveau, das länderspezifisch schwanken kann, mit einzubeziehen. Die in der Praxis zum Teil erheblich voneinander abweichenden Unfallraten einzelner Tunneln lassen sich auf Einflussfaktoren wie unterschiedliche nationale Vorgaben, Lage des Tunnels, Geometrie, Verkehr, Betriebsart, Sicherheitssysteme, Betriebsführung des Tunnels oder Klassifizierung zurückzuführen. Auch kann die Verwendung von älteren

Daten, ohne entsprechende zeitbezogene Korrekturen oder Anpassung auf objektspezifische Umstände, zu irreführenden Resultaten führen, die mit aktuellen Beobachtungen sowohl im Tunnel als auch auf der freien Strecke nicht in Übereinstimmung zu bringen sind.

Durch risikoorientierte Untersuchungen können verschiedene Brandszenarien durch Variation der Brandleistung bzw. der Anzahl und des Typs von betroffenen Fahrzeugen aufgestellt werden. In Abhängigkeit von Brand und Brandentwicklung ist theoretisch eine sehr feine Abstufung in eine Vielzahl von Klassen mit jeweils lediglich marginalen Unterschieden hinsichtlich des jeweiligen Risikos bzw. der jeweiligen Risikoänderung möglich. Aus Gründen der Handhabbarkeit wird jedoch in der

Praxis eine deutlich voneinander zu unterscheidende Einteilung durch entsprechende Differenzierung der Brandleistung mit entsprechend unterscheidbaren Risiken gegenüber einer kleinteiligen Risikoauflöcherung bevorzugt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Lkw in Brand gerät und zu welcher Größe sich der Brand entwickelt, hängt nicht zuletzt von der Brennbarkeit und der Menge der Ladung sowie vom Ausbreitungsverhalten des Brandes ab. Jeder der aufgeführten Aspekte kann mit Annahmen und Schätzungen hinterlegt werden, letztlich fehlen hierzu derzeit jedoch belastbare statistische Daten, so dass auch eine kleinstufige Risikobetrachtung nicht zwingend zu einer größeren Genauigkeit des Endergebnisses führt. Die Analyse von mehreren in einen Unfall verwickelten Fahrzeugen ist derzeit besonders unsicher [4].

Die Durchführung von Ausmaßabschätzungen im Zusammenhang mit Bränden ist im Rahmen von Modellen, wie beispielsweise Evakuierungsmodellen oder Rauchausbreitungsmodellen auch im Hinblick auf eine Vorhersage der Anzahl getöteter Personen oder Verletzten möglich, jedoch wegen des maßgebenden, letztlich jedoch nicht vorher-sagbaren Verhaltens der Tunnelnutzer sowie der jeweiligen Ausprägung der im Ereignisfall herrschenden Bedingungen im Tunnel nicht trivial. Die Schwierigkeit liegt dabei weniger in der Abbildung der entsprechenden Gegebenheiten (Räumung des Tunnels, Einwirkungen aufgrund von Rauch und Temperatur auf die Tunnelnutzer) in ein Modell, sondern vielmehr in der Wahl der Eingangsdaten und Modellannahmen, von denen die Belastbarkeit der erzielten Resultate letztlich abhängig ist.

An die Daten sind somit verschiedene Anforderungen zu stellen, um innerhalb von risikobasierten Verfahren bzw. Methoden in der Art verwendet werden können, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben worden ist. Je nach Fragestellung beziehen sich die Datenanforderungen und der Datenbedarf im ungünstigsten Fall auf das gesamte System Straßentunnel mit Infrastruktur, Fahrzeugen, Tunnelbetrieb und Tunnelnutzern, im günstigeren Fall lediglich auf Teilbereiche. Neben der reinen Datenmenge ist weiterhin die Datengüte und die Vergleichbarkeit der Daten von Bedeutung. Die Datenbasis sollte einerseits realistische Eingangsdaten für Berechnungen bereithalten, andererseits auch die Plausibilisierung der aus den Berechnungen erhaltenen Ergebnisse ermöglichen.

Einschränkungen bei der praktischen Anwendung risikobezogener Berechnungen ergeben sich u. a. durch die schmale Datenbasis sowohl bei der Ereignis- und Versagenshäufigkeit infrastruktureller Elemente, bei verkehrsbezogenen Aspekten als auch bezüglich einer quantifizierbaren Verhaltensbeschreibung von Tunnelnutzern. Diese Einschränkungen können den Wert eines quantitativen risikobezogenen Untersuchungsprozesses auch für den Straßentunnelbereich einschränken, so dass die erhaltenen Ergebnisse weniger im Hinblick einer mathematischen Gewissheit sondern vielmehr zur Ableitung einer Tendenz anzusehen sind. Zur Steigerung der Prognosegenauigkeiten ist daher eine Erweiterung der Datenbasis unter Beachtung der oben genannten Aspekte anzustreben.

4.5 Untersuchungsprozess für Straßentunnel

Auf der Basis der vorgenommenen Zusammenstellung von normativen und methodischen Vorgaben aus Regelwerken und Richtlinien sowie von Methoden, Ansätzen und Modellen soll nachfolgend ein mögliches Vorgehen für eine risikoanalytischen Untersuchung von Straßentunneln dargestellt werden.

Ein auf einem risikobezogenen Ansatz basierende Untersuchung für Straßentunnel besteht aus mehreren in Bild 8 dargestellten maßgeblichen Einzelschritten, welche die typischen Bestandteile einer risikobezogenen Untersuchung darstellen. Im Rahmen einer objektspezifischen Analyse werden weitere Darstellungen und Erläuterungen erforderlich sein.

Zur Analysevorbereitung können alle grundsätzlichen Schritte, wie beispielsweise die Festlegung von Untersuchungsgegenstand, -umfang, -tiefe, anzuwendenden Verfahren sowie weitere zu berücksichtigende Randbedingungen gezählt werden.

Die Risikoanalyse kann als das Schlüsselement innerhalb des Prozesses zur Beurteilung von Risiken gelten. Im Rahmen der Systembeschreibung erfolgt dabei eine Charakterisierung des Tunnels durch Erfassung aller relevanter baulicher und betrieblicher Daten insbesondere sicherheitsrelevanter Ausstattungsmerkmale.

Ausgehend von einem auslösenden Basisereignis (Panne, Unfall, Brand oder auch Fehlfunktionen der

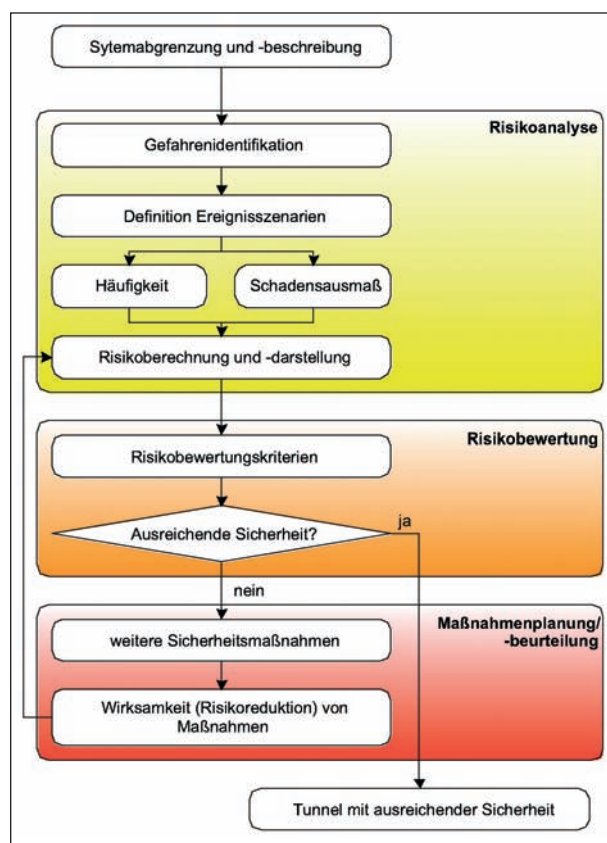


Bild 8: Risikobezogene Untersuchung für Straßentunnel, nach [3]

Tunnelinstallationen) sollen bei der Szenarienentwicklung strukturiert mögliche Abläufe bis zu jeweils stabilen Endzuständen in Verbindung mit der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens bzw. der Größe ihres Ausmaßes aufgestellt werden. Dem Schritt der Szenarienentwicklung folgt dann der Schritt der Risikoberechnung und der Risikodarstellung. Mittels der Risikoanalyse werden also mögliche Ereignisse und deren Abläufe bestimmt. Das Risiko ist dabei eine Aussage über die Zukunft mit den zwei Komponenten „Häufigkeit des Eintritts“ und „Größe der Auswirkungen beim Eintritt“. Rechnerisch ist das Risiko gleich der Häufigkeit des Eintritts mal der Größe der Auswirkungen.

Die Risikoanalyse versucht vereinfacht die Frage zu beantworten: „Was kann wie oft passieren und was sind die Folgen?“. Die Risikoanalyse soll in einer quantitativen Art durchgeführt werden. Auf der Basis einer quantitativen Analyse soll die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und seines Ausmaßes z. B. in Anzahl getöteter Personen/Verletzte, Sachschaden oder als Einschränkungen der Verfügbarkeit ausgedrückt werden, siehe auch Abschnitt 4.3.3.

Die sich anschließende Risikobewertung ist eng mit der Frage der Akzeptabilität von Risiken verbunden. In diesem Schritt soll die Frage: „Was darf wie oft passieren?“ geklärt werden. Für eine systematische und durchführbare Risikobewertung sind Risikokriterien zu definieren. Für eine Risikobewertung ist es notwendig festzustellen, ob und wann ein gegebenes Risiko annehmbar bzw. nicht mehr annehmbar ist und wann Maßnahmen zur weiteren Risikominimierung zu treffen sind.

Die Risikominimierung bzw. die Planung von (ergänzenden) Maßnahmen umfasst die Ermittlung und Beurteilung risikomindernder Maßnahmen mit den hiermit im Zusammenhang stehenden Kosten. Vereinfacht dargestellt kann die Wirksamkeit und das „Kosten/Nutzen-Verhältnis“ von Maßnahmen in der Art ermittelt werden, dass die Häufigkeit und das Ausmaß eines Szenarios unter Einbeziehung bzw. ohne Einbeziehung der Maßnahmen bestimmt und gegenüber gestellt werden. Beantwortet werden soll die Frage: „Welches sind die wirksamsten Maßnahmen für eine ausreichende Sicherheit des Systems?“ bzw. „Welches Kosten/Nutzen-Verhältnis weist eine Maßnahme im Vergleich zu einer anderen auf?“. Variationen bei der Systembeschreibung (z. B. Hinzufügung oder Entfernung sicherheitsrelevanter Komponenten, Abänderung verkehrlicher Randbedingungen) gehen als Iterationen bei der Szenarienentwicklung, der Wahrscheinlichkeits-/Ausmaßermittlung, der Risikoermittlung und der Risikobewertung ein.

Aufgrund der vorgenannten Eigenschaften wird von der Eignung quantitativer Risikoanalysen in folgenden Fällen ausgegangen:

- bei der Überprüfung der Schlüssigkeit einer sicherheitstechnischen Planung,
- bei der Wahl zwischen Alternativen,
- als Nachweis, dass Sicherheitsstandards auch bei Abweichungen von den Vorgaben erfüllt sind,
- zur Ermittlung bzw. Optimierung der Sicherheitsplanung im Hinblick der Kostenwirksamkeit einzelner Maßnahmen.

Die Ergebnisse einer Risikoanalyse können gleichfalls als Basis für ergänzende Untersuchungen, wie einer Kosten/Wirksamkeitsbetrachtung genutzt werden, welche sicherstellt, dass der für eine Risikominderung betriebene Aufwand einem entsprechenden Sicherheitsgewinn gegenübersteht. Diese

Möglichkeiten innerhalb eines risikobasierten Untersuchungsprozesses beinhaltet auch die in Abschnitt 3.3 erläuterte, auf der EG-Tunnelrichtlinie basierende methodische Vorgabe des Sicherheitsnachweises sowie eine in diesem Zusammenhang mit durchzuführende Kosten/Wirksamkeitsuntersuchung von Maßnahmen.

Zur Ermittlung der Notwendigkeit und des Umfangs eines über dem Normalfall liegenden und durch die Standardvorgaben nicht mehr abgedeckten Ausstattungsniveau sowie zur Überprüfung der Wirksamkeit einzelner Sicherheitsmaßnahmen werden Nachweise mittels ergänzender Verfahren in Form von Risikoanalysen gefordert. Dabei ist speziell der quantitative risikobasierte Ansatz als ein transparenter und in sich stimmiger Ansatz zur Entscheidungsfindung über die Behandlung von Risiken für einen Straßentunnel sowie zur Abwägung von Alternativen und für den Nachweis der Gleichwertigkeit unterschiedlicher Maßnahmen anzusehen.

Zusammenfassend können folgende Anforderungen an die Methodik von Risikoanalysen gestellt werden:

- Berücksichtigung der maßgebenden, das Risiko beeinflussenden Größen gemäß Artikel 13 i. V. m. Anhang I der EG-Tunnelrichtlinie bzw. Abschnitte 0.4 und 0.5 der RABT 2006 [2],
- bevorzugt ein quantitativer Untersuchungsansatz – zur Komplettierung fehlender Eingangsdaten müssen qualitative Verfahren ebenfalls zugelassen sein,
- Ergebnisdarstellung mittels der beiden Schadenindikatoren:
 - getötete Personen bzw.
 - Kosten.

5 Länderspezifisch realisierte Methoden

5.1 Allgemeines

Nach Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie [1] sind risikobezogene Untersuchungen für Straßentunnel bei bestimmten, in Abschnitt 4.2 zusammengestellten Randbedingungen durchzuführen. Für den Geltungsbereich der Richtlinie ist die Anwendung einer präzisen, genau definierten und einer optimalen Praxis entsprechenden Methodik sicherzustellen.

Europaweit lösten diese neuen Vorgaben umfangreiche Tätigkeiten hinsichtlich der Entwicklung und der Umsetzung neuer Untersuchungsverfahren aus. Während in manchen Staaten risikobezogene Verfahren bereits seit einigen Jahren gängige Praxis waren, wurden von anderen Staaten diese Verfahren als ergänzende Methoden zu bislang eher maßnahmeorientierten Verfahren zur Sicherheitseinschätzung der Tunnelbauwerke eingeführt.

Nachfolgend wird, im Sinne eines Überblicks über die gegenwärtig angewendete Praxis, auf die in verschiedenen europäischen Ländern jeweils zum Einsatz kommenden risikobezogenen Methoden eingegangen. Neben einer kurzen Beschreibung jeder Methode werden die jeweiligen Eigenschaften, die damit erreichbaren Ergebnisse und die mit der Risikoanalyse verfolgte Strategie dargestellt.

5.2 Frankreich – spezifische Gefährdungsuntersuchung

Das Brandereignis im Mont-Blanc-Straßentunnel führte in Frankreich zu erheblichen Forschungsaktivitäten für eine weitere Erhöhung der Tunnelsicherheit. Als ein Ergebnis dieser Arbeiten wurde im Jahr 2003 das Verfahren einer „Spezifischen Gefährdungsuntersuchung“ [8] mit Hinweisen für ihre Durchführung samt anzuwendender Methoden unter Berücksichtigung der Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie veröffentlicht. Das Verfahren ist auf Tunnel, die länger als 300 m sind anzuwenden, und umfasst folgende Einzelschritte:

- Zusammenstellung der Ausgangsdaten des Tunnels und seiner Umgebung,
- Funktionsbeschreibung,
- Ermittlung von Gefährdungen und Wahl von Szenarien,
- Untersuchung der Szenarien,
- Zusammenfassung.

Zur Durchführung dieser Schritte werden verschiedene Hilfsmittel eingesetzt. Dies sind insbesondere:

- eine quantitative Ermittlung der Häufigkeit auslösender Ereignisse,
- ein semi-quantitatives Verfahren zur Reihung auslösender Ereignisse unter Verwendung einer standardisierten Häufigkeits-Ausmaß-Matrix.

Diese sieht zur Charakterisierung der Häufigkeit eine sechsstufige Differenzierung von „A) sehr häufig“ bis „F) extrem selten“, und beim Ausmaß eine fünfstufige Differenzierung von „I) gering bis kein“ bis „V) große Katastrophe“ vor,

- eine quantitative Ausmaßanalyse (Rauchausbreitungsmodelle, Modelle des Verhaltens der Tunnelnutzer) erfolgt bei der Untersuchung repräsentativer Szenarien als Ergebnis der vorgenannten Matrix, unter Verwendung von Standardbränden. Diese Art der Untersuchung, einschließlich der Quantifizierung der Brandeinwirkungen, soll grundsätzlich die Kombination von Rauch- und Temperatursausbreitungsmodellen mit Modellen der jeweiligen Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer ermöglichen.

Die Zusammenfassung der Einzelergebnisse erfolgt sowohl grafisch als auch tabellarisch. Mit Hilfe eines Diagramms werden in Abhängigkeit von der Tunnellänge, der Zeit und dem jeweiligen Szenario die im Tunnel herrschenden Bedingungen dargestellt (s. Bild 9). Ein relativer Ausmaßvergleich zwischen den Szenarien erfolgt durch Vergleich mit einem der Szenarien, dessen Ausmaß zu 100 % gesetzt worden ist.

Die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen, beispielsweise einer Lüftungsvariante oder eines anderen Notausgangsabstandes, lässt sich aus dem Vergleich mehrerer wie in Bild 9 dargestellten Ergebnisübersichten als qualitatives Ergebnis ermitteln.

Die mit der spezifischen Gefährdungsanalyse zu erreichenden Ergebnisse und das Vorgehen zur Risikobewertung lassen sich wie folgt zusammenfassen [4]:

- Die spezifische Gefährdungsanalyse ermöglicht eine Abschätzung, inwieweit allgemein anerkannte Maßnahmen zur Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Unfällen umgesetzt sind.
- Für in Betrieb befindliche Tunnel, die die Vorgaben des geltenden Regelwerkes nicht vollständig erfüllen, ist abschätzbar, inwieweit die Abweichungen von den geltenden Standards noch annehmbar bzw. nicht mehr annehmbar sind.
- Die geplanten Maßnahmen für eine Verringerung sowohl der Eintrittswahrscheinlichkeit als auch des Ausmaßes von Unfällen sind darstellbar sowie die Maßnahmen zur Beherrschung des Ausfalls betriebstechnischer Einrichtungen

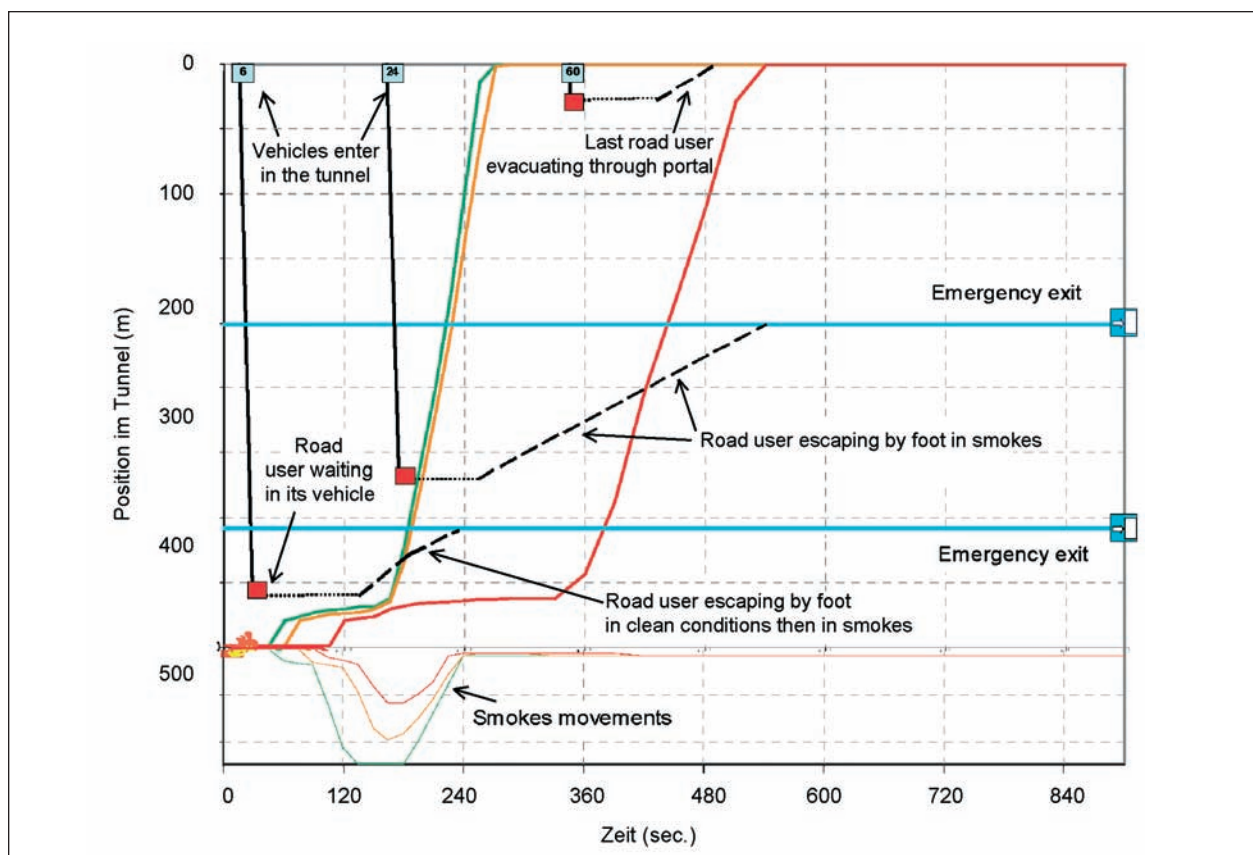


Bild 9: Ergebnisdarstellung der spezifischen Gefährdungsanalyse, nach [4]

ausreichend überprüfbar. Die Vermeidung eines vollständigen Ausfalls sicherheitsrelevanter betriebstechnischer Einrichtungen ist bereits bei der Planung der Anlage sicherzustellen.

- Wenn sinnvoll, können Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden.

Erkenntnisse aus der Durchführung der spezifischen Gefährdungsanalyse zielen primär auf die Erhöhung der Sicherheit des Tunnelnutzers und seiner Selbstrettungsmöglichkeiten ab. Diese hängt sowohl von der entsprechenden Dimensionierung als auch von der ordnungsgemäßen Funktion der Tunnelausstattung ab.

Die Möglichkeiten und Grenzen der spezifischen Gefährdungsanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Das Verfahren soll für einen weiten Bereich unterschiedlicher Tunnel eingesetzt werden können, für unkritische Anlagen genauso wie für hochkomplexe Bauwerke, für Tunnel in der Planung genauso wie für Tunnel im Bestand, für die das Sicherheitsniveau aufgrund von Nachrüstungsmaßnahmen neu zu bestimmen ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der spezifischen Gefährdungsuntersuchung ermöglichen:

- grundsätzlich die Aufstellung von Handlungsanleitungen und Betriebsanweisungen sowie die Erstellung entsprechender Gefahren- und Abwehrpläne in Zusammenarbeit mit den Einsatzkräften,
- wenn erforderlich, auch die Ableitung von Verbesserungen gegenüber dem Ist-Zustand (bei Tunneln in der Planung, im Bau, in Betrieb oder nach Abschluss von Nachrüstungsmaßnahmen), oder in Sonderfällen auch getroffene Entscheidungen zu hinterfragen,

In Folge der standardisierten Vorgaben werden folgende Vorteile dieser Methodik gesehen:

- Durchführung sowohl einer objektbezogenen Zustandsermittlung des Tunnels als auch der Ermittlung der Häufigkeit von auslösenden Ereignissen auf der Basis vereinheitlichter Vorgaben,
- qualitativer Vergleich der Sicherheitsniveaus von verschiedenen Tunneln,
- quantitative Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten Einflüsse durch Modellierung der kom-

plexen Wechselbeziehungen zwischen der Rauchausbreitung im Tunnel und dem Fluchtverhalten der Tunnelnutzer.

Insgesamt ist die „spezifische Gefährdungsuntersuchung“ somit eine szenariobasierte, qualitative Analyseverfahren, die sich sowohl für die Untersuchung spezieller Situationen als auch im Hinblick auf die angestrebte Untersuchungstiefe anpassen lässt. Die Methode erlaubt die Einbindung quantitativer Untersuchungsbestandteile, wie z. B. ein Rauchausbreitungsmodell oder Verhaltensmodelle der Tunnelbenutzer. [4].

5.3 Italienische Gefahrenanalyse für Straßentunnel

In Italien ist im Rahmen der Umsetzung der EG-Tunnelrichtlinie ein vereinheitlichtes quantitatives risikobezogenes Verfahren entwickelt worden. Dieses soll alle gebräuchlichen Elemente der quantitativen Risikoanalyse beinhalten, wie Ereignisbaumanalyse, Rauchausbreitungsmodelle und Modelle zur Abbildung des Verhaltens der Tunnelnutzer sowie die maßgeblichen Tunnelunfälle und ihre Auswirkungen (einschließlich von Gefahrgut) abbilden. Im Verfahren soll weiterhin die Einflüsse von sicherheitsrelevanten Teilsystemen im Hinblick auf ihre Verfügbarkeit berücksichtigt werden können [4].

Der in Italien zur Anwendung kommende risikoanalytische Ansatz basiert im Wesentlichen auf quantitativen Häufigkeits- und Schadensausmaßschätzungen (szenariobasierten Analysen). Entsprechend einer angepassten Fehlerbaumanalyse wird unterstellt, dass mittels einer festgelegten Bandbreite von auslösenden Ereignissen (insbesondere in Verbindung mit Tunnelbränden), dazugehörige Teilereignisse, einschließlich der entsprechenden Reaktionen der im Tunnel installierten Teilsysteme, eine Charakterisierung der gesamten Bandbreite aller im Tunnel denkbaren, voneinander unabhängigen Ereignisse ermöglicht wird.

Die Wahrscheinlichkeitsermittlung für den Eintritt eines auslösenden Ereignisses basiert einerseits auf statistischen Untersuchungen insbesondere von Unfällen mit Brandfolge, so genannte „Brandunfallraten“. Andererseits wird die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen, welche vom Verhalten der im Tunnel installierten Teilsysteme abhängen, von der Verfügbarkeit der einzelnen betriebstechnischen Tunnelausstattungs-elemente beeinflusst. Die

Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zweige des Ereignisbaumes wären somit in zweierlei Hinsicht mit dem zufälligen (Flucht)-Verhalten der Tunnelnutzer im Brandfall miteinander verbunden.

Die Schadensausmaßanalyse kommt zum Einsatz, um die räumlichen und zeitlichen Verteilungen physikalischer Größen und deren Einflüsse (Temperatur, Rauchdichte bzw. Sichtweite, Toxizität des Rauchs) auf die Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer in Folge eines Unfalls mit Brandfolge zu bestimmen. Alle diese Größen beeinflussen die Fluchtbedingungen in unterschiedlicher Weise, entsprechend den unterschiedlichen Zweigen des Ereignisbaums und dem Verhalten der Teilsysteme. Das Ausmaß wird generell als Anzahl der getöteten Personen angegeben.

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse und das Vorgehen zur Risikobewertung lassen sich in Bezug auf die italienische Gefahrenanalyse für Straßentunnel wie folgt zusammenfassen:

Aus der Übersichtstabelle des Anhangs I, Abschnitt 2.19 der EG-Tunnelrichtlinie, in Verbindung mit den sonstigen Sicherheitsanforderungen, insbesondere des Anhangs I, Abschnitt 1.1 der EG-Tunnelrichtlinie, werden zehn Tunneltypen abgeleitet. Maßgebend für die Einteilung sind Betriebsart, Länge und durchschnittlicher täglicher Verkehr pro Fahrstreifen, verbunden mit den jeweiligen unterschiedlichen Mindestanforderungen. In Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Tunneltypen (Typ I – X) zusammengestellt.

Zur Durchführung einer vergleichenden Untersuchung wird zwischen folgenden möglichen Sicherheitsausstattungen eines Tunnels differenziert:

- Der „virtuelle Tunnel“ entspricht von seiner Ausstattung her vollständig den Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie. Bei den einzelnen sicherheitsrelevanten Systemen sind die Mindestanforde-

rungen charakterisiert durch einwandfreie Verfügbarkeit und Wirksamkeit.

- Der „theoretische Tunnel“ ist entweder ein bestehender oder nachgerüsteter bzw. nachzurüstender Tunnel, der den Mindestanforderungen nach [1] nicht vollständig entspricht, jedoch eine ideale Verfügbarkeit und Wirksamkeit der sicherheitsrelevanten Systeme aufweist. Beim „theoretischen Tunnel“ können die Auswirkungen von Ausstattungsvarianten entweder durch zusätzliche, alternative oder sich ergänzende Ausstattungselemente untersucht werden.
- Der „tatsächliche Tunnel“ ist entweder ein bestehender oder nachgerüsteter bzw. nachzurüstender Tunnel, der den Mindestanforderungen nach [1] nicht vollständig, jedoch hinsichtlich Verfügbarkeit und Wirksamkeit der einzelnen sicherheitsrelevanten Systeme dem gegenwärtigen Stand der Technik entspricht.

Der Ansatz zur Risikountersuchung basiert auf der Verwendung zweier unterschiedlicher Risikoidikatoren. Der erste Indikator basiert auf einem Erwartungswert, dargestellt als die Anzahl getöteter Personen pro Jahr. Er wird für eine Art vergleichender Analyse bei denjenigen Tunneln herangezogen, die nicht vollständig den Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie entsprechen, statt dessen jedoch mit zusätzlichen alternativen oder sich ergänzenden Ausstattungselementen ausgerüstet sind.

Wenn der Risikoerwartungswert für einen betrachteten Tunnel kleiner oder gleich dem Risikoerwartungswert ist, den der Tunnel hätte, wenn er entsprechend den Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie ausgestattet wäre, sind keine zusätzlichen oder ergänzenden Untersuchungen für den Tunnel notwendig. Die alternative Ausstattung des Tunnels kann akzeptiert werden, wobei vorausgesetzt wird, dass die technischen Teilsysteme die jeweils unterstellte Leistung auch tatsächlich erbringen.

	$500 \leq L \leq 1.000$	$L > 1.000$	$500 \leq L \leq 1.000$	$1.000 \leq L < 3.000$	$L > 3.000$
Tunnel im Richtungsverkehr					
$T < 2.000 \text{ Fz/Fahrstreifen} \cdot d$	I	II			
$T < 2.000 \text{ Fz/Fahrstreifen} \cdot d$			III	IV	V
Tunnel im Gegenverkehr					
$T < 2.000 \text{ Fz/Fahrstreifen} \cdot d$	VI	VII			
$2.000 < T < 10.000 \text{ Fz/Fahrstreifen} \cdot d$			VIII	IX	X

Tab. 4: Tunneltypen, nach [4]

Im anderen Fall bzw. bei einem Tunnel mit besonderen Bedingungen („besonderer Charakteristik“) generell, ist eine vollständige Risikoanalyse durchzuführen, um sicherzustellen, dass die für die Teilsysteme angesetzte Leistung auch tatsächlich erreicht wird. In diesem Fall ist die Akzeptanz der alternativen Ausstattungswahl durch Vergleich mit dem, für den Tunnel festgelegten kollektiven Risiko (bzw. Gesamtrisiko) zu verifizieren.

Diese Funktion, eingefügt in ein Häufigkeits – Ausmaßdiagramm und unter Beachtung der durch das tolerierte bzw. akzeptierte Risiko definierten Grenzen, zeigt, ob die für den Tunnel vorgesehene Ausstattung ausreichend ist oder nicht.

Die Darstellung der Ergebnisse des risikoanalytische Verfahrens erfolgt als Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, Bild 10. Die die Summenkurven einhüllende monoton fallende Gerade (Limit Condition) ist abgeleitet aus der Ereignisbaumanalyse in Verbindung mit dem für den virtuellen Tunnel definierten Grenzkrisikos/Gesamtrisiko.

Aus dem Musterbeispiel geht hervor, dass die für den „tatsächlichen (actual) Tunnel“ ermittelte Summenkurve in Teilbereichen oberhalb des für diesen Tunneltyp definierten Grenzkrisikos liegt, so dass zur Risikominderung ergänzende Maßnahmen für den Tunnel vorzunehmen sind.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Das Risikomodell kann sowohl auf Tunnel im Bestand als auch für neue Tunnel angewendet wer-

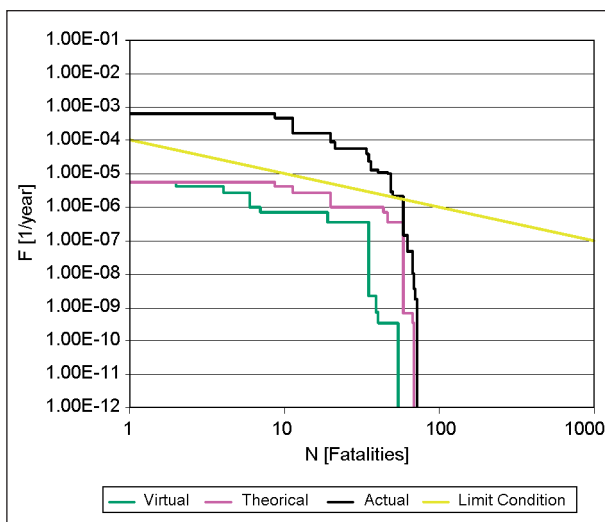


Bild 10: Virtuelle, theoretische und tatsächliche Risikoverteilung eines Tunnels [4]

den. Dies bezieht sich insbesondere auf die Auswahl ergänzender und für die Tunnel am besten geeignete zusätzliche Ausstattungselemente aber auch auf alternative Sicherheitsmaßnahmen, wenn die Möglichkeit einer Ausstattung des Tunnels gemäß den Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie nicht besteht.

Keine speziellen Einschränkungen bestehen bei der Anwendung der Methode im Hinblick auf bestimmte Tunneltypen, die Methode ist auf alle vorhandenen Tunnel anwendbar. Einige ergänzende Anforderungen sollten gegebenenfalls im Hinblick auf den Umgang mit bzw. der Zulassung von Gefahrguttransporten durch den Tunnel erwogen werden.

5.4 Niederlande

5.4.1 Allgemeines

In den Niederlanden kommen in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Die „Niederländische Szenarienanalyse für Straßentunnel“ ist eine deterministische, szenariobasierte Analysemethode, welche zum Ziel hat, die Handlungsabläufe von und zwischen den Beteiligten sowohl im Vorfeld, während und auch nach einem Unfall weiter zu verbessern. Die Methode zeichnet sich durch ein flexible Handhabung aus, wobei auch die Einbeziehung quantitativer Elemente, wie Modelle zur Schadensausmaßermittlung, möglich ist.

Die andere Methode ist ein „TunPrim“ genanntes quantitatives Risikoanalysemodell, ein ereignisbaumbasiertes Analyseverfahren zur Darstellung des Ablaufs und der Auswirkungen von Verkehrsunfällen, Explosionen und des Austritts von Gefahrgut.

5.4.2 Szenarienanalyse

Die szenariobasierte Analysemethode ist eine standardisierte deterministische (fest umrissene) Methode, die zur Ermittlung möglicher Schwachpunkte innerhalb eines Tunnelsystems (insbesondere für Maßnahmen bezogen auf die Infrastruktur oder die Organisation) dient. Sie hat zum Ziel, die Handlungsabläufe von und zwischen den Beteiligten sowohl im Vorfeld, während und auch nach einem Unfall weiter zu verbessern. Der Schwerpunkt liegt auf der Selbstrettung und dem Vorgehen der Einsatzdienste.

In einer Szenarienanalyse wird eine begrenzte Anzahl von Szenarien, die für das Tunnelsystem repräsentativ sind, detailliert untersucht, um die Effektivität infrastruktureller und organisatorischer Maßnahmen zur Kontrolle und Beeinflussung der möglichen Entwicklung der Szenarien zu ermitteln. In die Analyse gehen lediglich verkehrsbezogene Unfälle ein, wie Pannen, Fahrzeugkollisionen, Brände, Explosionen und Austritt von Gefahrgut, wobei die Häufigkeit der Szenarien nur hinsichtlich der Auswahl von relevanten Szenarien von Bedeutung ist.

Die Methode umfasst:

- Festlegung der Sicherheitskriterien (Kriterien für die Vorbeugung, Ausmaßminderung, Selbstrettung und Vorgehen der Einsatzdienste),
- Beschreibung des Tunnelsystems,
- Auswahl relevanter Szenarien,
- Analyse der Einflüsse und Ausmaße,
- Bewertung der Resultate, eine Empfehlung zur Optimierung der Ausführung und Beschreibung des verbleibenden Restrisikos.

Die Schadenausmaßanalyse erfolgt in einer qualitativen Weise, die Darstellung der Unfallentwicklung und des jeweiligen Zustandes des Tunnelsystems erfolgt, wie in Bild 11 dargestellt, in Zeit-schritten.

Gleichwohl geht in der Analyse auch eine (berechnete) quantitative Information mit ein, wie die Anzahl der Fahrzeuge, betroffene Tunnelnutzer, die Brandleistung, Gefährdungsabstände und die Anzahl von Opfern. Die Einbeziehung von Schadenausmaßmodellen ist gleichfalls möglich [4].

Die Ergebnisse aus der szenariobasierten Analyse-methode sind:

- eine Beschreibung der Anzahl von Szenarien in qualitativer und quantitativer Form;
- eine Evaluierung von Akzeptanzkriterien,
- Schlussfolgerungen,
- Verbesserungsvorschläge.

Hinsichtlich des Anwendungsbereichs und der Grenzen ist festzuhalten, dass der Akzent der Methode auf der Ausmaßermittlung der ausgewählten Szenarien liegt. Die Häufigkeit der Szenarien als solche spielt innerhalb der Analyse keine Rolle, obwohl das Szenario „vorstellbar“ sein muss. Die Häufigkeit hat jedoch Einfluss bei der Entscheidung über zusätzlich zu treffende Sicherheitsmaßnahmen. Sehr kostenintensive zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen werden nicht umgesetzt, wenn sie sich lediglich auf ein Szenario mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auswirken. Die Beschreibung möglicher Ereignisabläufe wird als ein gutes Kommunikationshilfsmittel gesehen, da es die Entwicklung eines Szenarios anschaulich macht und


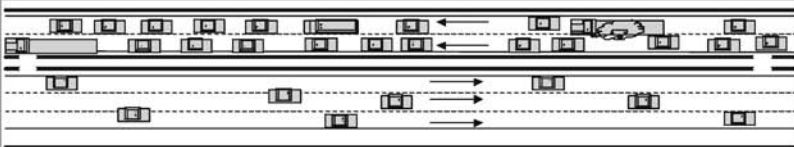
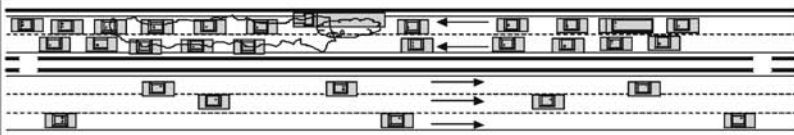
Step	Name	Time	Overview	Population						Atmosphere
				Vehicles in tube where incident occurs	Vehicles in other tubes	Persons in tube where incident occurs	Persons in escape tube	No. of fatalities	Persons rescued	
0	Build-up to incident	< 0		186	70	307	0	0	0	Normal
10	Incident	0		186	70	307	0	0	0	Normal
20	Detection/ alarm	120s		155	70	256	0	0	0	Oppressive / lethal at short distance from fire (5-10m)

Bild 11: Darstellung des Ereignisablaufs (Ausschnitt), nach [4]

einen Einblick über die Wirkungsweise von Sicherheitsmaßnahmen verschafft. Da das Risiko, also das Ergebnis von Häufigkeit und Ausmaß nicht quantifiziert wird, ist die Kosten-Wirksamkeit von Maßnahmen nicht ermittelbar.

5.4.3 Tunprim-Modell

Das TunPrim Modell ist ein systemorientiertes Tabellenkalkulationsmodell zur Durchführung quantitativer Analysen. Das Modell wurde zur Ermittlung des jeweiligen Risikos von einem zweiröhriigen Richtungsverkehrstunnel aufgestellt, in Verbindung mit bzw. ohne einer in Längsrichtung betriebenen Tunnellüftung. Im Modell werden die Störfälle Kollision, Brand, Explosion und Austritt von aggressiven bzw. giftigen Stoffen berücksichtigt.

Während die Häufigkeit der auslösenden Ereignisse (Unfallraten, Brandentstehungsraten) mittels Datenauswertung, also über einen statistischen Ansatz ermittelt wird, erfolgt die Bestimmung der Häufigkeit innerhalb der Szenarien mittels einer Ereignisbaumanalyse, also über einen analytischen Ansatz. Das Schadenausmaß für jeden Zweig des Ereignisbaums wird über die Anzahl der Todesopfer dargestellt. Je nach Art des auslösenden Ereignisses wird bei den Opfern zwischen „direkten Opfern“ als Resultat eines „normalen“ Verkehrsunfalls, Opfer innerhalb eines Fahrzeugs bei Fahrzeugbrand und Opfer in Folge von Bränden, Explosionen und/oder des Austritts von giftigen Stoffen differenziert.

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse werden dargestellt als [4]:

- Risiko-Erwartungswert. Dieser stellt die durchschnittliche Anzahl getöteter Personen pro Jahr dar.
- Das individuelle Risiko als Risiko pro Personen-Kilometer wird aus dem Erwartungswert, der Tunnellänge, dem jährlichen Verkehrsaufkommen und der durchschnittlichen Anzahl von Fahrzeuginsassen abgeleitet.
- Gesellschaftliches Risiko, dargestellt in Form einer Häufigkeits-/Ausmaßkurve.

In den Niederlanden gelten folgende Risikoakzeptanzkriterien für Tunnelnutzer [4]:

- Individuelles Risiko: $1,0 \times 10^{-7}$ pro Personenkilometer,
- Gesellschaftliches Risiko: $1,0 \times 10^{-1/N^2}$ pro km pro Jahr (N = getötete Personen).

Im Hinblick auf den Anwendungsbereich und der Grenzen soll das Modell verwendet werden können:

- zum Vergleich von Alternativen,
- zur Bestimmung des Einflusses (der Risikoreduktion) von (zusätzlichen) Maßnahmen,
- zur Ermittlung des Sicherheitsniveaus eines neuen Tunnels oder eines Tunnels im Bestand (Vergleich zwischen Akzeptanzkriterien),
- zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses für die Wahl von Sicherheitsmaßnahmen,
- zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses für die Festlegung der Routen für Gefahrguttransporte.

Im Modell sollen alle verkehrsbezogenen Unfallarten berücksichtigt werden können. Andere Vorkommnisse, wie Überflutung oder Erdbeben finden innerhalb des Modells keine Berücksichtigung [4].

5.5 Österreichisches Tunnel-Risikoanalysemodell TuRisMo

Das Tunnel-Risikoanalysemodell ist ein systemorientiertes quantitatives Untersuchungsmodell. Es umfasst mehrere Methoden, um das gesamte System sicherheitsrelevanter Einflussfaktoren darstellen zu können. Ereignisablaufanalysen dienen zur Ermittlung des Verlaufs und des Ausmaßes möglicher auslösender Ereignisse. Mittels statistischer Ansätze wird die Häufigkeit von auslösenden Ereignissen und deren Verteilung innerhalb der Ereignisbaumanalyse bestimmt.

Grundsätzlich bietet das Tunnel-Risikoanalysemodell TuRisMo die Möglichkeit, nahezu alle maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Tunnelsicherheit in quantitativer Form zu erfassen und zu berücksichtigen, sofern die für das Modell benötigten Eingangsdaten vollständig zur Verfügung stehen. Die im Rahmen der Risikoanalyse abschließend zu berücksichtigenden Einflussfaktoren sind im Vergleich zu der in Anhang 1, Absatz 1.1.2 der EG-Tunnelrichtlinie um die Punkte

- Tunnellüftung,
- Notausgangsabstand,
- zusätzliche Konfliktpunkte (Verflechtungsstellen),

- Längsneigung vor und im Tunnel,
- zeitlicher Ablauf von Detektion – Inbetriebnahme Lüftung – Evakuierung,
- Abstellstreifen und Pannenbuchten

erweitert worden. Auf eine besondere Charakteristik einzelner Einflussfaktoren wird nicht explizit eingegangen, die Größe ihres Einflusses geht entweder mittels Korrekturfaktoren oder durch ergänzende Simulationsergebnisse in die Häufigkeits- und Ausmaßanalyse ein.

Der Anwendungsbereich wird durch die im Rahmen der Schadensausmaßanalyse untersuchten Tunneltypen definiert, denen allgemein folgende Berechnungsgrundlagen zu Grunde liegen:

- Tunnelquerschnitt mit zwei Fahrstreifen,
- ebene Tunneloberflächen (keine Unterzüge o. Ä.),
- keine Lüftungssystem-Kombinationen,
- Maximaldauer der Branddetektion 150 s.

Bereits bei einer nicht zutreffenden Berechnungsgrundlage sind mögliche Auswirkungen auf die Schadensausmaßschätzung zunächst qualitativ zu überprüfen und bei relevanten Auswirkungen durch zusätzliche Simulationen zu ergänzen. Gefahrgutrisiken innerhalb des Tunnelrisikomodells sind eher allgemein gehalten. Eine genaue Untersuchung

spezifischer Gefahrgutrisiken erfordert daher den Einsatz anderer, gegebenenfalls zusätzlicher Methoden, wobei in Österreich auch der Einsatz des OECD/PIARC DG QRA-Modells (vgl. Abschnitt 5.7) erwogen wird [9].

Das Modell besteht aus den folgenden zwei Kernelementen:

- einer quantitativen Häufigkeitsanalyse (Ereignisbaumanalyse)
- einer quantitativen Unfallfolgenanalyse (Schadensausmaßanalyse)

Der grundsätzliche Ablauf der Tunnel-Risikoanalyse geht aus Bild 12 hervor.

Mit der Ereignisbaumanalyse wird die Häufigkeit definierter Ereignisabläufe ermittelt. Beginnend mit einem auslösenden Ereignis, vorgegeben als Basiswert für die Pannenrate bzw. als Basiswerte für die Unfallrate in Abhängigkeit vom jeweiligen Tunneltyp als Häufigkeit pro 1 Mio. Kfz-km vorgegeben ist, werden in mehreren Stufen mögliche Folgeereignisse mit ihren jeweiligen Häufigkeiten als unterschiedliche Szenarien entwickelt. Diese unterscheiden sich neben dem Initialereignis, z. B. durch die Anzahl und/oder Art der beteiligten Fahrzeuge, durch die Art der Brandentstehung, der Brandentwicklung und der absoluten Größe des Brandes oder die Beteiligung von Gefahrgut. Aus den angenommenen Verzweigungen des Ereignisbaums

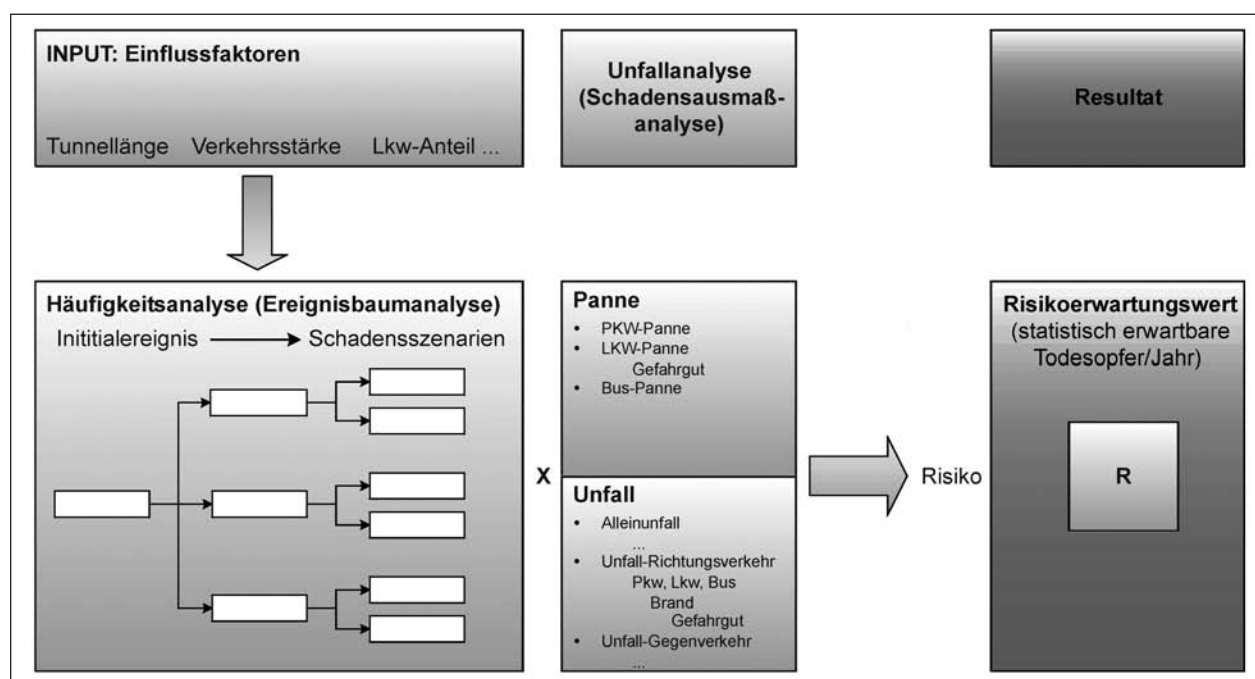


Bild 12: Ablauf der Tunnel-Risikoanalyse, nach [9]

entstehen 28 Schadenszenarien. Einflussfaktoren mit allgemeiner Auswirkung auf die Häufigkeit einzelner Schadenereignisse werden in Form von relativen Veränderungen (Korrekturfaktoren) an den Verzweigungen der Ereignisbäume im Modell berücksichtigt. Mit Hilfe der Schadenausmaßanalyse werden für jedes Szenario die sich hieraus ergebenden möglichen Schäden abgeschätzt. Das Schadenausmaß setzt sich je nach Schadenszenario aus bis zu fünf verschiedenen Komponenten zusammen. Differenziert wird dabei in Unfälle mit mechanischen Schadenswirkungen, Unfälle mit Brandfolge und Unfälle mit Beteiligung von Gefahrgut. Letztere werden jedoch lediglich in einem grob vereinfachten Ansatz berücksichtigt.

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse und das Vorgehen zu Risikobewertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse werden dargestellt als Risiko-Erwartungswert mit der durchschnittlichen Anzahl getöteter Personen pro Jahr und Bauwerk (Risikoerwartungswert statistisch erwartbare Tote/Jahr, auch als Risikoäquivalentwert R bezeichnet). Der Wert wird ermittelt aus dem spezifischen Risiko (statistisch zu erwartende getötete Personen pro 1 Mio. Kfz-km) multipliziert mit den Werten der Tunnellänge, des DTV und der Anzahl der Betriebstage für den untersuchten Tunnel. Das Risiko bezieht sich auf das gesamte Tunnelbauwerk (bei zweiröhriigen Tunneln auf beide Tunnelröhren). Die Risikoanteile infolge mechanischer Schadensauswirkungen, Brandwirkungen und Gefahrgutwirkungen können getrennt dargestellt werden [9].

Die Bewertung der Ergebnisse der Tunnel-Risikoanalyse beruht auf einem relativen Vergleich. Ein Tunnel wird dann als sicher angesehen, wenn er unter Berücksichtigung spezifischer Kennwerte (z. B. DTV, Lkw-Anteil) einen für dieses Bauwerk typischen Standard (z. B. in Bezug auf die bauliche Ausgestaltung, betriebstechnische Ausstattung usw.) aufweist. Dieser Standard entspricht den Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln entsprechend der Vorgaben des Straßentunnelsicherheitsgesetzes (STSG) [7] bzw. der EG-Tunnelrichtlinie. Der für einen bestimmten Tunnel ermittelte Risikoerwartungswert wird dem Risikoerwartungswert eines vergleichbaren Referenztunnels, der exakt die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln erfüllt, gegenübergestellt; bei Unterschreitung des Mindestsicherheitsniveaus des

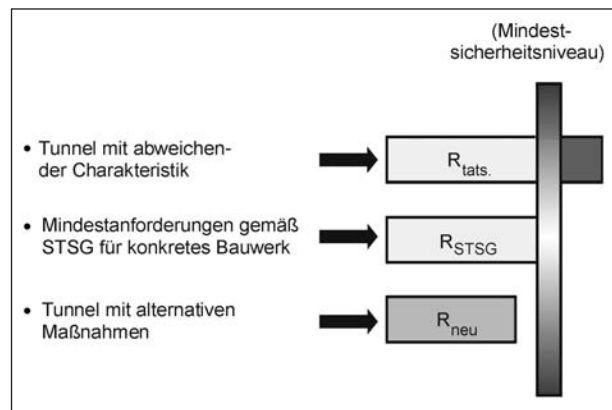


Bild 13: Risikobewertung mittels TuRisMo, nach [9]

Referenztunnels sind die Abweichungen durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen auszugleichen, siehe Bild 13.

Die Möglichkeiten und Grenzen des Modells stellen sich wie folgt dar:

Neben der Durchführung von sicherheitsanalytischen Untersuchungen insgesamt kann das Modell auch zur Entscheidungsfindung im Hinblick auf die Auswahl von Sicherheitsmaßnahmen für neue oder Nachrüstmaßnahmen und deren Reihenfolge für Tunnel im Bestand herangezogen werden. Das Modell wurde auf Grundlage der Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie entwickelt und deckt alle in der Richtlinie definierten Anwendungsbereiche mit Ausnahme der Gefahrgutproblematik ab. Während der Entwicklungsarbeit sind erhebliche Datenmengen erfasst, ausgewertet sowie entweder in das Modell eingearbeitet oder als ergänzend zu verwendende Eingangsdaten bereitgestellt worden [9]. Mit Hilfe des Tunnel-Risikoanalysemodells kann die Wirksamkeit von zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen, bezogen auf den Risikoerwartungswert, in den meisten Fällen quantitativ abgeschätzt werden. Dadurch soll es möglich sein:

- bei Unterschreitung des Mindestsicherheitsniveaus oder bei risikoe erhöhenden Einflüssen durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen das Erreichen des Mindestsicherheitsniveaus nachzuweisen,
- verschiedene Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Risikominderung zu vergleichen.

Hierdurch soll eine umfassendere, über die rein verkehrssicherheitstechnische Betrachtung hinausgehende Bewertung von Sicherheitsmaßnahmen z. B. mittels Kosten-Wirksamkeitsuntersuchungen

von Sicherheitsmaßnahmen, Dringlichkeitsreihungen für Nachrüstungsmaßnahmen usw. geschaffen werden [9].

5.6 Deutschland

Das in Deutschland zukünftig zur Anwendung empfohlene Verfahren ist eine szenariobasierte, quantitative Untersuchungsmethodik [3]. Zur Berücksichtigung des gesamten Spektrums sicherheitsrelevanter Einflussfaktoren stützt es sich auf die Methoden der quantitativen Risikoanalyse, wie Ereignisbaumanalyse oder Ausmaßanalyse unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Anwendung weiterer Modelle ab.

Bezogen auf den Anwendungsbereich der Methodik gilt der Grundsatz, dass Straßentunnel entsprechend den Vorgaben der RABT 2006 [2] auszustatten bzw. zu planen sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein Tunnel, der den Vorgaben entspricht, ein ausreichendes Sicherheitsniveau aufweist.

In bestimmten Fällen sind nach den RABT 2006 für Tunnel über 400 m Länge jedoch Risikoanalysen entsprechend der in [3] erarbeiteten Methodik vorzunehmen. Die Anwendung der Methodik ist erforderlich,

- wenn eine besondere Charakteristik gemäß Anhang I, Abschnitt 1.1.3 i. V. m. Abschnitt 1.1.2 der EG-Tunnelrichtlinie vorliegt,
- zur Festlegung der Lüftungsart bei Gegenverkehrstunneln,
- zur Ermittlung der Gleichwertigkeit kompensatorischer Maßnahmen im Bestand bei Abweichungen von den Vorgaben der RABT 2006.

Die Methodik beschreibt die Vorgehensweise bei der risikoanalytischen Untersuchung eines Tunnels, wenn einer oder mehrere der drei oben genannten Punkte erfüllt ist. Die Methodik dient jedoch nicht zur Ermittlung, wann einer dieser Punkte erfüllt ist. Sie hat insbesondere nicht die Aufgabe zu klären, wann eine „besondere Charakteristik“ vorliegt. Diese Frage ist vielmehr objektspezifisch zu beantworten.

Risikoanalysen für Gefahrguttransporte entsprechend Abschnitt 9 der RABT werden durch die Methodik nicht abgedeckt. Eine genaue Untersuchung spezifischer Gefahrgutrisiken erfordert den Einsatz

anderer, ggf. auch zusätzlicher Methoden, wie z. B. das OECD/PIARC DG QRA-Modell (vgl. Abschnitt 5.7) [12]. Allerdings liegt in Deutschland bislang keine validierte Methodik vor.

Das nach [3] entwickelte Verfahren orientiert sich nach dem in Abschnitt 4.5 beschriebenen Untersuchungsprozess für die Untersuchung und Bewertung der Risiken von Straßentunneln.

Im Rahmen der Risikoanalyse sind in einem ersten Schritt die maßgeblichen Gefahren und daraus abzuleitende Ereignisszenarien zu ermitteln. Aus einer Vielzahl möglicher Initialereignisse und Szenarienabläufe, vgl. auch Bild 4, sind im Rahmen der Methodik als maßgebliche Initialereignisse die beiden Ereignisse „Kollision“ (ohne Brand) und „Brand“ (ohne Gefahrgut i. S. d. ADR [14]) ermittelt worden.

Um die Abgrenzung der einzelnen Szenariotypen voneinander deutlicher hervorzuheben, wird jeweils der „worst-case“ eines Szenarios unterstellt. So wird ein Brand, der sich aufgrund einer Kollision ereignet, den Szenarien des Initialereignisses „Brand“ und nicht den Szenarien des Initialereignisses „Kollision“ zugeordnet.

Zur Steigerung der Flexibilität im Hinblick auf die Anwendbarkeit auf verschiedene Tunneltypen werden die Risiken für jede Tunnelröhre einzeln ermittelt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung tunnelröhrenspezifischer z. B. geometrischer oder verkehrlicher Besonderheiten.

Die zwei risikoanalytischen Kernelemente des Verfahrens sind die quantitative Ereignisablaufanalyse (Ereignisbaumanalyse) zur Ermittlung der Häufigkeiten und die quantitative Schadensausmaßanalyse.

Auf der Basis einer Ereignisablaufanalyse werden jeweils separat für die beiden o. g. Szenariotypen „Kollision“ und „Brand“ die resultierenden Risiken des Tunnels zunächst für den Ausgangszustand, daran anschließend unter der Annahme, dass alle Vorgaben eingehalten sind (Referenzzustand) und, wenn erforderlich, noch für alternative Sicherheitsmaßnahmen untersucht.

Bei der Ereignisablaufanalyse werden, beginnend mit einem auslösenden Ereignis, dessen Häufigkeit bekannt ist, in mehreren Schritten mögliche Folgeereignisse mit ihren jeweiligen Häufigkeiten entwickelt. Beim Initialereignis „Kollision“ unterscheiden sich die einzelnen Szenarien z. B. durch die Anzahl und/oder

die Art der beteiligten Fahrzeuge und der jeweiligen Höhe und Verteilung des Schadenausmaßes, dargestellt als Personen- oder Sachschäden. Beim Initialereignis „Brand“ sind Variationen z. B. durch die Lage des Brandortes, der verkehrlichen Situation, der Brandentwicklung, der absoluten Größe des Brandes oder der Verteilung des Schadenausmaßes und seiner jeweiligen Höhe möglich. Aus der für jeden Ereignisablauf ermittelten Häufigkeit und des Ausmaßes kann das dazugehörige so genannte kollektive Risiko bestimmt werden. In Bild 14 ist anhand eines Fallbeispiels die Struktur des Ereignisbaums für das Initialereignis Kollision dargestellt.

Neben der Ermittlung der kollektiven Risiken erfolgt die Ergebnisdarstellung von Ereignisbaumanalysen auch in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen. Durch Summation über alle Ereignisszenarien, deren Schadenausmaß größer oder gleich einem vorgegebenen Wert ist, wird die kumulative Häufigkeit für jedes Schadenausmaß ermittelt, die im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm als so genannte Summenkurve, vgl. auch Bild 6, darzustellen ist.

Um eine Beurteilung der Kosten-/Wirksamkeit von Maßnahmen vorzunehmen, wird im Rahmen der

Methodik der Begriff des so genannten monetarisierten Risikos (R_m) eingeführt, das von der Unfallhäufigkeit, dem Schadenausmaß dem Aversionsfaktor und den Grenzkosten abhängig ist.

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

R_m : monetarisertes Risiko [€/Jahr]

H_{ik} : Unfallhäufigkeit [1/Jahr]

A_{ik} : Ausmaß [Todesopfer, €, etc.]

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

i: Ereignis

k: Schadenindikator (Todesopfer, Sachschäden etc.)

Der Aversionsfaktor berücksichtigt dabei die Unterschiede in der Wahrnehmung von Unfällen mit großen Auswirkungen im Vergleich zu einer großen Anzahl kleiner Unfälle mit insgesamt dem gleichen Schadenausmaß.

Die Grenzkosten sind ein Maß für die Zahlungsbereitschaft um risikoreduzierende Maßnahmen zu

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	P_e	Grenzkosten [€]	P_m
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
		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
	56.1%	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 14: Ereignisbaum des Szenariotyps Kollision mit dem Schadenindikator „getötete Personen“ (Fallbeispiel) [3]

ergreifen. Über die Grenzkosten wird somit explizit festgelegt, welche Maßnahmen noch sinnvoll bzw. welche Maßnahmen nicht mehr sinnvoll sind. Die Grenzkosten legen somit quantitativ die Verhältnismäßigkeit fest.

Ein kollektives Risiko, welches mit einem Aversionsfaktor eine subjektive Gewichtung erhält, wird auch als „bewertetes kollektives Risiko (Re)“ bezeichnet.

Die entweder als Risikokenngröße oder in Form von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ausgewiesenen Risiken lassen keine Aussage über ihre jeweilige Akzeptanz zu. Dies ist vielmehr im Rahmen der Risikobewertung zu beantworten.

Trotz subjektiver Elemente in der Risikobewertung sind die gleichen Anforderungen an die Transparenz, Einheitlichkeit und Nachvollziehbarkeit der Bewertungsmethodik wie bei der Risikoermittlung anzustreben. Somit ist auch eine quantitative Risikobewertung mittels quantitativer Kriterien vorzunehmen.

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 getötete Personen. Zur Beurteilung werden die Risiken eines Tunnels im Bestand oder in der Planung, der die Richtlinienanforderungen nicht erfüllt, einem sonst gleichen Tunnel jedoch mit richtlinienkonformer Ausstattung gegenübergestellt. Die Risikodarstellung als Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm ermöglicht einerseits einen relativen Vergleich der jeweiligen Risiken der Tunnel insgesamt. Andererseits ermöglicht die Darstellung auch die Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Maßnahmen auf das Risiko.

Während zur Beurteilung der Risiken ein relativer Vergleich als ausreichend erachtet wird, sind bei der Bewertung von Maßnahmen mittels Kosten-Wirksamkeit neben ihrer risikomindernden Wirkung auch die mit ihrer Realisierung bzw. ihrem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Für die Beurteilung einer vorgesehenen Alternativ-Maßnahme nach deren Kosten-Wirksamkeit müssen die so genannten Jahreskosten ermittelt werden, die sich projektspezifisch aus den Investitionskosten und den jährlichen Betriebs- und Instandhaltungskosten zusammensetzen. Die Beziehung zwischen Maßnahmen, Kosten und der Risikominderung lässt

sich in einem Diagramm mit den beiden Achsen „Risiko“ und „Kosten“ aufzeigen, vgl. Bild 15. Jede Sicherheitsmaßnahme bzw. deren Kostenfolgen und ihre risikomindernde Wirkung lässt sich innerhalb des Diagramms als Punkt darstellen [3].

Die Beurteilung der Maßnahmen erfolgt anhand ihres Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses. Die Kosten (K/Jahr bzw. ΔK) als auch die Wirkung (Rm bzw. ΔR) beziehen sich auf ein Jahr und sind als monetäre Einheit in € ausgedrückt:

Das Beurteilungskriterium lässt sich in einem Risiko-Kosten-Diagramm verdeutlichen. In Bild 16 sind Maßnahmen aufgrund der Risikoreduktion und der Kosten als Punkte eingetragen. Alle Maßnahmen die unterhalb der Geraden mit der Steigung -1 liegen, werden als günstig beurteilt, die oberhalb der Geraden liegenden als ungünstig. Neben Einzelmaßnahmen sind auch Maßnahmenkombinationen zu untersuchen. Da die Abschätzung der Kosten und der Risikoreduktion mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist, werden für die Beurteilung auf

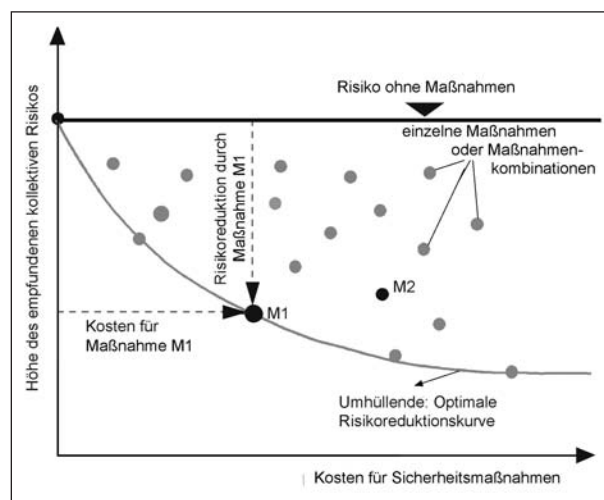


Bild 15: Risikominderung und Kosten für zusätzliche Maßnahmen [3]

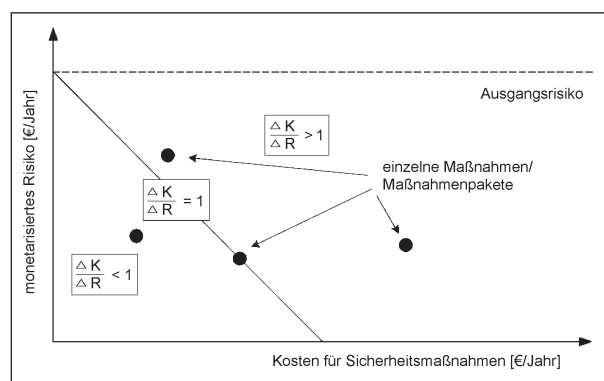


Bild 16: Risiko-Kosten-Diagramm [3]

Basis des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses folgende Kriterien vorgeschlagen [3]:

- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 1 : Maßnahme(n) sind zu realisieren,
- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ≥ 1 und < 2 : Maßnahmenrealisierung ist im Einzelfall zu prüfen,
- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ≥ 2 : Maßnahmenrealisierung ist nicht kostenwirksam.

Die neben theoretischen Erwägungen aus praktischer Sicht vorgenommene Festlegung der jeweiligen Grenzen ist auf zunächst nur schmaler Berechnungsbasis erfolgt. Die vorgeschlagenen Grenzen sollten daher noch mittels einer größeren Anzahl von Beispielen abgesichert werden.

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse und das Vorgehen zu Risikobewertung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die entwickelte risikoanalytische Untersuchungsmethodik basiert auf einer quantitativen Risikoanalyse und ermöglicht die Berücksichtigung der wesentlichen risikorelevanten Einflussgrößen. Für die Quantifizierung sind teilweise Annahmen zu treffen, da noch nicht zu allen Aspekten ausreichende Grundlagen und statistische Daten vorhanden sind. Die quantitative Vorgehensweise ermöglicht es jedoch, die getroffenen Annahmen nachvollziehbar transparent darzustellen. Mittels ggf. zu einem späteren Zeitpunkt vorliegenden, ergänzenden Grundlagendaten, können die einzelnen Einflussgrößen bzw. deren quantitative Werte bei Bedarf angepasst werden, an der grundsätzlichen methodischen Vorgehensweise sollten weitere Anpassungen deshalb nicht mehr erforderlich sein. Auch die Berücksichtigung zusätzlicher Einflussgrößen sollte ohne Änderung der Grundprinzipien des Vorgehens erfolgen können.

Während die eigentliche Risikoanalyse über die Höhe der Risiken Auskunft gibt, wird im Rahmen der Risikobewertung ihre Tragbarkeit beurteilt. Zur Beurteilung werden die Risiken eines Tunnels im Bestand, der die Richtlinienanforderungen nicht erfüllt, einem gleichen Tunnel mit richtlinienkonformer Ausstattung gegenübergestellt. wobei davon ausgegangen wird, dass ein nach RABT 2006 ausgestatteter Tunnel als sicher eingeschätzt werden kann. Die Risikodarstellung als Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm ermöglicht einen relativen Vergleich der jeweiligen Risi-

ken, auch als Resultat von unterschiedlichen getroffenen Maßnahmen.

Mit diesem maßnahmenorientierten Bewertungsansatz wird ein innerhalb bestimmter Bandbreiten schwankendes Sicherheitsniveau für verschiedene Tunnel definiert. Die Bandbreiten sind noch anhand der jeweils auftretenden Risiken für eine größere Anzahl richtlinienkonform ausgestatteter, jedoch unterschiedliche Randbedingungen aufweisende Tunnel zu ermitteln.

Die Darstellung und Bewertung der risikomindernden Wirkung von alternativ geplanten Maßnahmen erfolgt mittels Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm in Verbindung mit einem relativen Vergleich. Die Beurteilung der Kostenwirksamkeit erfolgt durch Gegenüberstellung von monetarisierendem Risiko und jährlichen Kosten für die Sicherheitsmaßnahme sowie Festlegung von Kriterien für die Umsetzung.

5.7 OECD/PIARC QRA Modell für Gefahrguttransport

Das von OECD/PIARC entwickelte Quantitative-Risikoanalyse-Modell für Gefahrguttransporte in Straßentunneln und Umfahrungsstrecken (OECD/PIARC DG QRA-Modell) [12] wird als eine Entscheidungsgrundlage für die Genehmigung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel u. a. in Frankreich, Österreich, Großbritannien und Tschechien zukünftig herangezogen werden. In Abhängigkeit von jeweiligen verschiedenartigen Bedingungen einzelner Umfahrungsstrecken, im Vergleich zu den konstanten Bedingungen der Tunnelstrecke, lassen sich unterschiedliche Risiken entweder mittels eines relativen Vergleichs der kollektiven Risiken zwischen Tunnelstrecke und jeweiliger Umfahrungsstrecke oder anhand absoluter Risikoerwartungswerte ermitteln. Das Modell ist zur Überprüfung der aktuellen als auch als ein Planungsinstrument zur Darstellung der zukünftigen Situation des Tunnels einsetzbar.

In einem ersten Schritt wird ein Risikoerwartungswert für den Tunnel selbst ermittelt. Dieser hängt ab von der jährlichen Anzahl erwarteter Opfer aufgrund des Transports gefährlicher Güter auf der Tunnelroute, die den Tunnel selbst und Abschnitte der freien Strecke umfasst. Im Fall einer Tunnelkette wird ein summierter Erwartungswert errech-

net. In die Risikoermittlung gehen insbesondere Verkehrsaufkommen und Unfallraten, jedoch auch gewisse Eigenschaften des Tunnels selbst (Länge, Geometrie, Neigung) ein.

In einem weiteren Schritt werden für die Alternativroute(n) eine der Tunnelroute entsprechende Datenerfassung mit vergleichbarer Detailtreue, die Berechnung des gesellschaftlichen Risikos für die jeweiligen verglichenen Routen (FN Kurven, Erwartungswerte) und eine Sensitivitätsanalyse für die Haupteinflussgrößen (allgemein: Bevölkerungsdichte, Gefahrgutverkehr, Gesamtverkehr, Unfallraten) vorgenommen.

Nach Ermittlung des Risikoerwartungswertes für den Tunnel (genauer: die Tunnelroute) kann der innerhalb des Verfahrens zu betreibende Aufwand maßgeblich davon beeinflusst werden, ob ein absoluter oder relativer Risikovergleich vorgenommen wird. So wird z. B. im Rahmen der französischen Umsetzung des Modells ein Risikoerwartungs-Grenzwert für den Tunnel eingeführt, mit dem der im ersten Schritt ermittelte Risikoerwartungswert des Tunnels verglichen wird. Ist der Erwartungswert des Tunnels geringer als der Grenzwert, ist das Verfahren mit dem Ergebnis abzuschließen, dass der Tunnel ausreichend sicher und eine weitere Untersuchung von Alternativrouten nicht mehr erforderlich ist. Liegt der Erwartungswert oberhalb des Grenzwertes, wird die Untersuchung fortgesetzt, um alternative Routen, d. h. die Route durch den Tunnel einerseits mit einer oder mehreren Umfahrstrecken andererseits im Hinblick auf die jeweils auftretenden Risiken vergleichen zu können.

Der absolute Risikovergleich ist gegenüber dem relativen Vergleich dann vorteilhaft, wenn der Risikoerwartungswert des Tunnels den Grenzwert unterschreitet, weil dann die Untersuchung abgeschlossen werden kann. Beim relativen Vergleich hingegen muss stets der Vergleich zwischen der Tunnelroute und mindestens einer Alternativroute vorgenommen werden.

Das DG QRA Modell erlaubt eine quantitative risikobezogene Untersuchung mittels einer quantitativen Häufigkeits- und einer quantitativen Ausmaßanalyse.

Bestandteil des Modells sind die Ergebnisse einer Ablaufanalyse, die als bedingte Wahrscheinlichkeiten der Häufigkeit und des Ausmaßes von auslösenden Ereignissen, wie Unfall oder Panne, und

daraus resultierender, verschiedener Folgeereignisse dargestellt sind. Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine in das Modell integrierte Tabelle mit Werten (Zahlen) für insgesamt 13 repräsentative Szenarien. Die für jedes Szenario im Modell hinterlegten Werte berücksichtigen die jeweiligen unterschiedlichen Randbedingungen eines Tunnel oder der freien Strecke sowie städtischem oder ländlichem Bereich.

Die Ergebnisse aus der Risikoanalyse und das Vorgehen zu Risikobewertung lassen sich in Bezug auf das DG QRA-Modell wie folgt zusammenfassen:

- Die mit dem DG QRA-Modell gewonnen Ergebnisse lassen sich in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen darstellen.
- Nach Art der Umsetzung kann sowohl eine absolute als auch relative Risikobewertung vorgenommen werden.

Das Modell erscheint gut geeignet zur Entscheidungsvorbereitung einer Erlaubnis ohne oder mit Auflagen oder eines Verbots von Gefahrguttransport in Straßentunneln. Zur Durchführung einer Risikoanalyse für Tunnel im Hinblick auf die Ermittlung eines allgemeinen Sicherheitsniveaus, zur Abwägung zwischen einzelnen Sicherheitsmaßnahmen oder zur Maßnahmenplanung innerhalb des Tunnels ist das Modell jedoch nicht ausgelegt.

Die Ergebnisse, aus denen die Schlussfolgerungen für die jeweilige Behandlung des Gefahrguttransportes abgeleitet werden, sind ohne vertiefte Kenntnisse der Wirkungsweise des Modells nicht ohne weiteres nachzuvollziehen und den Entscheidungsträgern daher nur mit einem erhöhtem Aufwand vermittelbar.

Wie eingangs erwähnt, wird in Frankreich, Österreich, Großbritannien und Tschechien das OECD/PIARC QRA-DG Modell zur Entscheidungsfindung über die Genehmigung bzw. das Verbot von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel zukünftig eingesetzt. In Deutschland ist das Modell bislang lediglich in Einzelfällen zum Einsatz gekommen. Als problematisch für die Anwendung wird die noch ausstehende Validierung der Ergebnisse gesehen. Auch ist die Art der Risikobewertung noch ungeklärt. Weitere Ergebnisse hierzu aus ergänzenden Forschungsvorhaben von den vorgenannten Ländern stehen derzeit noch aus.

6 Beurteilung der Verfahren

6.1 Erfahrungen aus der Anwendung der Verfahren

6.1.1 Allgemeines

Die Anwendung der verschiedenen Methodikbausteine in einem Gesamtverfahren, vergleiche Bild 3 sowie die Erläuterungen im Anhang 2, ist je nach spezifischen Anforderungen und Komplexität der betrachteten Fragestellungen und Anwendungsgebiete unterschiedlich. Insbesondere bei quantitativen Methoden werden erfahrungsgemäß häufig verschiedene Methodikbausteine in Kombination angewendet. Bei der Anwendung von Mischformen ist jedoch eine eindeutige Identifizierung der jeweils verwendeten Methoden/Methodikbausteine schwierig. Mit zunehmender Komplexität der Systeme werden i. d. R. verstärkt quantitative Methoden wie etwa logische Bäume, Simulationen oder Ausbreitungs- und Wirkungsmodelle verwendet. Quantitative Verfahren stützen sich oftmals auf statistische Auswertungen in Kombination mit Expertenschätzungen, beispielsweise um Lücken in den Datengrundlagen schließen zu können.

Die Erfahrungen im Umgang mit Sicherheitsbetrachtungen zeigen, dass für systemübergreifende Betrachtungen die Anwendung von quantitativen Methoden praktisch nicht zu umgehen ist. Nur mit quantitativen Methoden kann eine anschauliche und vergleichbare Ermittlung und auch Bewertung von Risikokenngrößen gewährleistet werden. Durch die Quantifizierung kann somit die für eine Sicherheitsbetrachtung erforderliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit und damit auch die Vergleichbarkeit gewährleistet werden. Als Vorteil einer quantitativen Erfassung und Verarbeitung von Risikokenngrößen ist die dabei herrschende strenge Logik bei der Informationsverarbeitung zu sehen, die bei qualitativen Methoden nicht annähernd erreicht werden kann. Trotz der Quantifizierung bleibt jedoch oftmals das Problem, dass Risiken im Zusammenhang mit seltenen Ereignissen nur mit beträchtlichen Unschärfen ermittelt werden können. Die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung können dann eher als Größenangabe, nicht aber als ein exaktes Resultat gewertet werden. Diese Tatsache sowie der erhöhte Aufwand von quantitativen Risikoanalysen stellen i. d. R. die Hauptkritikpunkte dar. Bei qualitativen „Expertenverfahren“ besteht hingegen häufig die Gefahr, dass die beiden Komponenten Risikoanalyse und

Risikobewertung nicht hinreichend voneinander abgegrenzt werden.

6.1.2 Länderspezifische Erfahrungen

Die jeweils dargestellten länderspezifischen risikobasierten Untersuchungen erlauben eine strukturierte, vereinheitlichte und nachvollziehbare Darstellung objektspezifischer Risiken, ihre Gewichtung und ihre Wechselbeziehungen sowie die Darstellung des möglichen Ausmaßes von Ereignissen für den einzelnen Tunnel. Außerdem machen es risikobasierte Untersuchungen möglich, die Vorteilhaftigkeit einer zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme auch im Vergleich zu anderen Maßnahmen über die durch sie bewirkte Risikominderung darzustellen. Diese Darstellung kann weiterhin unter dem Aspekt der Kostenwirksamkeit den bestmöglichen Einsatz der nur begrenzt zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel sicherstellen.

Für die innerhalb einer risikobezogenen Untersuchung abzuarbeitenden Schritte Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung steht eine große Bandbreite qualitativer und quantitativer Methoden bzw. Modelle zur Verfügung. Die Darstellung der in einzelnen Ländern durchgeführten Praxis zeigt auf, dass eine Kombination der unterschiedlichen Verfahren verwendet wird, jedoch kann keine der für die Risikoanalyse oder die Risikobeurteilung verwendeten Methoden bzw. Methodenkombinationen als ein Optimum bezeichnet werden.

Die Wahl der Methoden erfolgt, indem die zu erwartenden Vorzüge und Nachteile im Hinblick auf die Beantwortung einer spezifischen Fragestellung abgewogen werden. Die am besten geeignete Methode zur Untersuchung des fraglichen Sachverhalts zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass mit ihr das zu Grunde liegende Problem erfasst, der für die Untersuchung erforderliche Tiefgang erreicht und die zur Verfügung stehenden Ressourcen eingehalten werden. Es ist zu berücksichtigen, dass quantitative Methoden, wie z. B. Simulationen oder statistische Auswertungen, im Normalfall vielschichtiger und umfangreicher und deshalb mehr Aufwand als qualitative Untersuchungen, wie z. B. Expertenschätzungen oder Checklistenverfahren, erfordern. Weiterhin benötigen quantitative Methoden spezielle angepasste (quantitative) Eingangsdaten, die entweder nicht oder nicht in der erforderlichen Güte vorhanden sind. Weiterhin kann zwischen den einzelnen Methoden insbesondere dann

nicht mehr nicht willkürlich gewählt werden, wenn Elemente innerhalb der Risikobewertung zwingend auf eine spezielle Ergebnisdarstellung aus der Risikoanalyse angewiesen sind.

In der Praxis werden zur Bearbeitung objektspezifischer Fragestellungen meist mehrere verschiedene Methoden gewählt und oftmals auch so miteinander kombiniert, dass eine genaue Abgrenzung untereinander nicht mehr möglich ist. Als Beispiel kann die Verbindung aus Expertenannahmen und/oder -schätzungen genannt werden, auf die oftmals im Zusammenhang mit quantitativen Berechnungen zurückgegriffen wird, um einen Mangel an Daten für eine statistische Analyse auszugleichen.

Diese anwendungsbezogenen Unzulänglichkeiten verdeutlichen, dass die Möglichkeiten zur Vereinheitlichung der Methodik zur Durchführung von Risikoanalysen für Straßentunnel begrenzt sind. Dies liegt nicht zuletzt in den unterschiedlichen Zielsetzungen der Untersuchung aufgrund nationaler Besonderheiten und Vorgaben. Da diese zum Teil erheblich voneinander abweichen, erscheint es fraglich, ob lediglich eine einzige Methode die erforderliche Untersuchungsbreite und -tiefe angemessen abbilden kann.

Dennoch sollte für die Zukunft eine Entwicklung allgemein anwendbarer Richtlinien zur Durchführung von Risikoanalysen für Straßentunnel möglich sein. Die Vereinheitlichung einiger spezifischer Elemente der Risikoanalyse (z. B. auslösende Ereignisse, Szenarien, Brandentstehung, Brandleistung und -entwicklung, Datensammlung und Auswertung von Daten) scheint möglich zu sein, ohne die Flexibilität der Methoden zu begrenzen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Frage der Risikoermittlung und die Festlegung, welches Risikoniveau noch akzeptabel ist, bei welchem Risikoniveau Zusatzmaßnahmen ergriffen werden, wichtige aber auch sehr kontrovers zu diskutierende Aspekte der Risikobewertung sind.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung ist die Frage der Risikobewertung lediglich aus dem Blickwinkel von hierfür erforderlichen und geeigneten risikobezogenen Methoden als notwendige Vorarbeit für die Durchführung einer Risikobewertung betrachtet worden. Die Probleme, Möglichkeiten aber auch Einschränkungen in Abhängigkeit von verschiedenen Strategien sind nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung, sollten jedoch zu einem späteren Zeitpunkt und bei Vorliegen von weiteren Erfahrungen detailliert diskutiert werden. Die Auswahl geeigneter

Strategien für die Risikobewertung hängt nicht zuletzt auch von den jeweiligen nationalen Regelungen ab. So könnte beispielsweise aus den untersuchten praktischen Methoden geschlossen werden, dass die EG-Tunnelrichtlinie Untersuchungen auf der Basis relativer Vergleiche favorisiert. Die Untersuchung mehrerer angewandter Methoden und ihre Anwendung an Fallbeispielen [4] zeigt, dass der Prozess einer risikobasierten Sicherheitsuntersuchung von Straßentunneln eine strukturierte harmonisierte und nachvollziehbare Untersuchung der Risiken des jeweiligen Tunnels bedarf, mit der Berücksichtigung der maßgebenden Einflussfaktoren. Eine risikobasierte Untersuchung im Zusammenhang mit der Sicherheitsuntersuchung von Straßentunneln ist somit als eine geeignete und wichtige Ergänzung zur Durchführung notwendiger Maßnahmen zur Erfüllung der Vorgaben auch von maßnahmenorientierten Regelwerken und Richtlinien zu sehen.

6.1.3 Gefahrgut

Die EG-Tunnelrichtlinie differenziert nicht zwischen unterschiedlichen „Arten“ von Risikoanalysen, weder zur Ermittlung der Tunnelausstattung bei Tunneln mit einer „besonderen Charakteristik“ noch bei der Zulassung von Gefahrgut. Andererseits sieht die EG-Tunnelrichtlinie den verbindlichen Einbau von Ausstattungselementen (z. B. Schlitzrinnen mit Rückhalteeinrichtungen, Lüftungssysteme) für einen sicheren Transport von Gefahrgütern durch Straßentunnel vor.

Das bereits in Frankreich, Österreich, Großbritannien und Tschechien zum Einsatz kommende OECD/PIARC QRA-DG Modell zur Entscheidungsfindung der Genehmigung bzw. des Verbotes von Gefahrguttransport in Straßentunneln, zeigt auf, dass die Tendenz eher zu einer getrennten und mit unterschiedlichen Verfahren durchzuführenden Ermittlung und Bewertung baulicher und betrieblicher Risiken auf der einen und der Risiken aus dem Gefahrguttransport auf der anderen Seite geht.

Die nicht vorhandene Differenzierung der EG-Tunnelrichtlinie setzt sich in den RABT fort. Dies war mit ein Grund dafür, dass neben anderen Berechnungsverfahren auch das OECD/PIARC Modell in Deutschland zwischenzeitlich vereinzelt angewendet worden ist. Problematisch bei der Anwendung sowohl dieses als auch anderer Modelle ist die zumindest für Deutschland noch ausstehende Validierung der Ergebnisse. Diese Validierung müsste

zum einen durch Überprüfung und Vergleich der Berechnungsergebnisse aus der Anwendung sowohl des selben als auch des Vergleichs mit anderen Modellen an einer größeren Anzahl unterschiedlicher Tunnelbauwerke erfolgen.

Auch ist die Frage, auf welcher Basis eine Risikobewertung für Gefahrguttransporte vorgenommen werden kann, genau so offen, wie die nach ADR [14] zukünftig vorzusehende Klassifizierung von Tunnel zur Genehmigung bestimmter Gefahrguttransporte. Es bleibt abzuwarten, inwieweit weitere Ergebnisse aus ergänzenden Forschungsvorhaben in den vorgenannten Ländern für die Beantwortung der noch offenen Fragen herangezogen werden können.

6.1.4 Besondere Charakteristik

Der durch die EG-Tunnelrichtlinie eingeführte Begriff der „besonderen Charakteristik“ eines Tunnelbauwerkes bezeichnet Abweichungen von der Sicherheit in Straßentunneln, die aus einem von Infrastruktur, Tunnelbetrieb, Tunnelnutzer und Fahrzeugen gebildeten wechselwirkenden Zusammenhang bestimmt wird und durch Einflussgrößen zur Darstellung dieses Zusammenhangs in Anhang I, Abschnitt 1.1.2 und 1.1.3 der EG-Tunnelrichtlinie beschrieben sind. Auch die EG-Tunnelrichtlinie geht nicht darauf ein, welche Abweichungen eine besondere Charakteristik konkret auszeichnen, wie Abweichungen zu quantifizieren sind, wie groß und wie häufig Abweichungen sein dürfen, um einzeln oder in ihrer Gesamtheit eine Besonderheit darzustellen. Mit dieser gewollten „Unschärfe“ kann den unterschiedlichen Bedingungen der Mitgliedstaaten der EU Rechnung getragen werden, jedoch um den Preis einer in den einzelnen Mitgliedstaaten unterschiedlichen Einschätzung einer besonderen Charakteristik.

Die Vorgehensweise zur Feststellung der besonderen Charakteristik eines Tunnelbauwerkes sind auch aus der Darstellung der jeweiligen Methodik zur Durchführung risikoanalytischer Untersuchungen im Allgemeinen nicht zu entnehmen. In einem Fall wird das Problem insofern umgangen, indem eine Risikoanalyse für jeden Tunnel ab einer Tunnellänge von über 300 m Länge zwingend vorgeschrieben wird (Frankreich).

Eine andere Möglichkeit zur Ermittlung einer besonderen Charakteristik wird in einer jeweils objektbezogenen Untersuchung der Einflussparameter

und ihrer möglichen gegenseitigen Beeinflussung in Form einer qualitativen Abwägung gesehen. Die Vorgehensweise, durch Festlegung von Grenzwerten für jeden einzelnen maßgeblichen Einflussparameter eine besondere Charakteristik aufgrund von einer oder mehreren Über- bzw. Unterschreitungen abzuleiten, wird hingegen als nicht zielführender Ansatz gesehen.

6.2 Erfüllung der Richtlinien-Anforderungen

Entsprechend der Anhänge der EG-Tunnelrichtlinie sind Risikoanalysen in verschiedenen Situationen erforderlich. In Tabelle 4 ist zusammengestellt, welche der in den einzelnen Ländern angewendeten Methoden die in Abschnitt 3 zusammengestellten Anforderungen der EG-Tunnelrichtlinie an risikobezogene Untersuchungen in welchem Umfang erfüllen.

In der Tabelle 4 werden darüber hinaus noch diejenigen Sachverhalte bei der deutschen Methodik farblich (gelb) hinterlegt, für die nach Tabelle 2 eine Risikoanalyse entsprechend Artikel 13 EG-Tunnelrichtlinie/Abschnitt 0.5 RABT 2006 vorzunehmen ist. Im Gegensatz dazu sind diejenigen Punkte, für die auch davon abweichende risikoorientierte Untersuchungsverfahren angewendet werden können, nicht markiert.

6.3 Umsetzung des Untersuchungsprozesses

In Abschnitt 4.5 wurde ein mögliches Vorgehen für eine risikoanalytische Untersuchung von Straßentunneln vorgestellt, das auf der Basis von normativen und methodischen Vorgaben aus Regelwerken und Richtlinien sowie gängiger Methoden, Ansätze und Modellen zusammengestellt wurde.

Neben dem Anwendungsbereich ist die Art der Durchführung mit den maßgeblichen Einzelschritten Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung bzw. -beurteilung einer risikoanalytischen Untersuchung für die in Abschnitt 5 dargestellten landesspezifischen Verfahren in Tabelle 5 zusammengefasst.

Der Anwendungsbereich bzw. die Notwendigkeit der Durchführung einer risikoanalytischen Untersuchung wird durchaus unterschiedlich gesehen, als untere Grenze kann dabei die Vorgabe gelten, dass

jeder Tunnel über 300 m Länge zu untersuchen ist. Überwiegend ist eine Untersuchung bei Vorliegen von objektspezifischen Besonderheiten, einer besonderen Charakteristik oder bei Unterschreitung von Mindestanforderungen entweder auf der Basis nationaler Regelwerke oder EG-Tunnelrichtlinie durchzuführen.

Die Zusammenstellung der in einzelnen Ländern herrschenden Praxis im Hinblick auf die Durchführung der Risikoanalyse zeigt auf, dass eine Kombination der unterschiedlichen Verfahren verwendet wird. Bei der Gefahrenidentifikation bzw. der Ermittlung auslösender Ereignisse werden statistische Untersuchungen aber auch Expertenschätzungen zur Ermittlung der Häufigkeit be-

stimmter Ereignisse (Brand, Unfall) oder des Ausfalls betriebstechnischer Ausstattungselemente herangezogen und daraus Vorgaben hinsichtlich der zu berücksichtigenden auslösenden Ereignisse abgeleitet.

Bei der Definition bzw. Reihung von Szenarien wird bevorzugt von vorgegebenen repräsentativen Szenarien ausgegangen. Bei einigen Verfahren (Niederlande-Szenarienanalyse, OECD/PIARC DG QRA-Modell) wird auf eine weitere Reihung der Szenarien verzichtet. Bei den anderen Verfahren wird eine Reihung nach ihrer Häufigkeit mittels einer Ereignisbaumanalyse zur Ermittlung der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt.

Parameter (EG-Tunnelrichtlinie)	TuRisMo (Österreich)	Niederländische Szenarienuntersuchungen	TUNPRIM (Niederlande)	Französische Gefährdungsanalyse	Italienische Risikoanalyse	Deutsche Risikoanalysemethodik	OECD/PIARC DG QRA Modell
Kosten-Wirksamkeit (Artikel 3)	x	x	x	x	x	✓	x
Berücksichtigung einer besonderen Charakteristik spezieller Einflussfaktoren (Anhang I, 1.1.2/1.1.3)	✓1)	✓3)	✓	✓3)	✓	✓	✓4)
Abweichungen von den minimalen Sicherheitsanforderungen (Anhang I, 1.2.1)	✓	✓3)	✓	✓	✓	✓	✓4)
Einfluss der Lkw-Anzahl der Lkw (Anhang I, 1.3.2)	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓
Einfluss starker Steigung (Anhang I, 2.2.3)	✓1)	✓	✓1)	✓	✓	✓	✓4)
Einfluss schmaler Fahrsteifen auf Lkw (Anhang I, 2.2.4)	✓1)	x	✓1)	✓	✓	✓5)	✓1), 4)
Erlaubnis von Gefahrguttransporten (Anhang I, 2.6.2)	x2)	✓	x	x2)	x	✓	✓
Wahl des Lüftungssystems (Anhang I, 2.9.3)	✓	✓3)	✓3)	✓3)	✓	✓	x
Wahl des Standorts der Rettungsdienste (Anhang I, 3.4)	x	✓	x	x	x	x	x
Risikoanalyse aufgrund von Gefahrguttransporten (Anhang I, 3.7)	x2)	✓	✓	x2)	✓	x	✓
1) als Eingangsdaten werden spezielle statistische Informationen der zu untersuchenden Parameter benötigt 2) Verwendung des OECD/PIARC-DG QRA-Modells u. a. 3) mit Einschränkungen 4) Anwendung ist begrenzt auf den Gefahrguttransport 5) durch Regelwerk ausgeschlossen							

Tab. 4: Berücksichtigung normativer Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie im jeweiligen Verfahren, nach [4]

Die Häufigkeits-/Ausmaßermittlung erfolgt bei den meisten Verfahren quantitativ, entweder mittels szenario- oder systembasierter Modelle. Bei allen Verfahren wird jeweils eine standardisierte Untersuchungsmethodik verwendet. Bei zwei Verfahren, die sich durch eine Kombination semiquantitativer bzw. auch qualitativer Methoden auszeichnen, ist die in Abschnitt 6.1.2 beschriebene Problematik der gegenseitigen Verfahrensabgrenzung zu beobachten.

Die Risikoermittlung und -darstellung erfolgt je nach Methodik entweder als qualitative grafische bzw. tabellarische Ergebnisdarstellung oder als quantitative Darstellung. Als ein Schadenindikator wird bei allen quantitativen Verfahren die Größe „Anzahl getöteter Personen“ verwendet.

Die Risikobewertung ist eng mit der Art der Risikodarstellung verbunden. Sie erfolgt bei den überwiegend qualitativ durchgeführten Risikoanalysen entweder anhand von Kriterien eines eingehaltenen Standes der Technik oder über den Ausmaßvergleich ausgewählter Szenarien. Bei den überwiegend quantitativ durchgeführten Risikoanalysen erfolgt die Bewertung anhand eines relativen Vergleichs eines tatsächlichen Risikoerwartungswertes mit dem Risikoerwartungswert, den das System mit der jeweiligen Mindestsicherheitsausstattung hätte, (z. B. Österreich, Italien), eines relativen Vergleichs zwischen den, die Risiken darstellenden Summenkurvenverläufe (z. B. Deutschland, Italien) oder als absoluter Vergleich zwischen den Summenkurven und einer vorgegebenen absoluten oberen Risikogrenze (Niederlande-TunPrim).

Die Maßnahmenplanung und -beurteilung, welche die Aspekte Maßnahmenwirksamkeit, Wahl von Alternativen, den Nachweis gleicher Sicherheit von kompensatorischen Maßnahmen sowie die Kostenwirksamkeit einzelner Maßnahmen beinhaltet, orientiert sich – im Hinblick auf die drei erstgenannten Aspekte – an der Ergebnisdarstellung der Risikoanalyse für das jeweilige Verfahren als ein qualitativer oder quantitativer Maßnahmenvergleich. Die Ermittlung der Kostenwirksamkeit einzelner Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen ist aktuell lediglich auf das deutsche Modell beschränkt.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich alle die in Abschnitt 5 dargestellten Verfahren im wesentlichen auf die beschriebene Vorgehensweise eines risikobezogenen Ansatzes zur Untersuchung von Straßentunneln mit den oben aufgeführten Einzelschritten orientieren. Sie erlauben somit eine strukturier-

te und nachvollziehbare Darstellung objektspezifischer Risiken sowie ihre Bewertung.

Im Hinblick auf eine anzustrebende Weiterentwicklung und Harmonisierung risikoanalytischer Verfahren kann aus der Zusammenstellung eine Tendenz hin zu breiter anwendbaren Methoden zur Durchführung von Risikoanalysen für Straßentunnel sowie die Normierung einiger spezifischer Elemente der Risikoanalyse abgeleitet werden.

6.4 Empfehlungen

Für die Entwicklung und Durchführung praxisorientierter risikobezogener Untersuchungen wird die Beachtung folgender Aspekte als vorteilhaft angesehen:

- Unabhängig von der Art der Methode bildet diese die Wirklichkeit immer vereinfachend ab. Das jeweils eingesetzte Verfahren kann eine Tendenz, jedoch nie den Verlauf eines tatsächlichen Ereignisses aufzeigen. Es hilft jedoch bei der Entscheidungsfindung auf einer abgesicherten und vergleichbaren Basis sowie reproduzierbarer Ergebnisse.
- In Verbindung mit der Auswahl einer Methodik ist die Art der geplanten Auswertung bereits mit zu berücksichtigen, da die Methode für eine Risikoanalyse und Risikobewertung nicht voneinander unabhängig sind.
- Wann immer möglich, sind objektspezifische Daten für quantitative Methoden zu verwenden. Wenn objektspezifische Daten nicht ermittelbar sind, ist mindestens der Ursprung von Daten, dessen ersatzweise Verwendung vorgesehen ist, im Hinblick auf vergleichbare Randbedingungen z. B. in Bezug auf die Infrastruktur, Verkehr, usw., zu überprüfen. Zu beachten ist auch, dass ein Modell Bedingungen impliziert, die im zu untersuchenden Tunnel unter Umständen nicht vorhanden sind.
- Risikobezogene Untersuchungen sollten ausschließlich von Fachleuten mit ausreichender Erfahrung und ausreichendem Verständnis für die Methoden, die sie verwenden, durchgeführt werden.
- Das Resultat einer quantitativen Risikoanalyse ist als Größenangabe und nicht als exakte Zahl zu verstehen. Risikomodelle liefern unvermeidlich unscharfe Resultate, so dass eine Risikobe-

	Frankreich	Italien	Niederlande		Österreich	Deutschland	OECD/PIARC DG-QRAM
			Szenarienanalyse	TunPrim			
Notwendigkeit einer Risikoanalyse; Anwendungsbereich	Vorgabe: jeder Tunnel ab 300 m Länge	besondere Charakteristik, Unterschreitung von Mindestanforderungen nach EG-Tunnelrichtlinie	objektbezogen	objektbezogen: Risikermittlung für einen zweiröhren Richtungsverkehrstunnel bei Variation der Lüftung	besondere Charakteristik; Unterschreitung von Mindestanforderungen nach STSG	besondere Charakteristik; Lüftung; Maßnahmenalternativen zur RABT	jeder für Gefahrgut zuzulassende Tunnel
Systemabgrenzung, Zustandsermittlung des Tunnel	Zustandsermittlung des Tunnels auf der Basis vereinheitlichter Vorgaben	Zustandsermittlung des Tunnels auf der Basis der Mindestanforderungen der EG-Tunnelrichtlinie	Übereinstimmung mit den Anforderungen bezüglich kollektivem und individuellem Risiko mittels vorab durchgeführter quantitativer Risikoanalyse	Zustandsermittlung durch Vergleich mit den Anforderungen kollektivem und individuellem Risiko	Zustandsermittlung auf der Basis des STSG/der RVS	Zustandsermittlung auf der Basis der RABT	Parametervorgaben
Durchführung der Risikoanalyse							
Gefahrenidentifikation/Auslösende Ereignisse	statistische Untersuchungen, Vorgaben	statistische Untersuchungen ("Brandunfallraten", Ausfallraten, betriebstechnischer Ausstattungselemente)	objektbezogene Experteneinschätzung	statistische Untersuchungen (Brandraten, Unfallraten)	Aus statistischen Untersuchungen und Expertenschätzungen resultierende Vorgaben	Aus statistischen Untersuchungen und Expertenschätzungen resultierende Vorgaben	Aus statistischen Untersuchungen resultierende Vorgaben
Definition/Reihung von Szenarien	Vorgabe repräsentativer Szenarien/ Standardisierte semiquantitative Häufigkeitsermittlung	Eintrittswahrscheinlichkeitsermittlung mittels Ereignisbaumanalyse	Vorgabe repräsentativer Szenarien/ kein Einfluss der Häufigkeit	Eintrittswahrscheinlichkeitsermittlung von Szenarien mittels Ereignisbaumanalyse	Eintrittswahrscheinlichkeitsermittlung von Szenarien mittels Ereignisbaumanalyse	Eintrittswahrscheinlichkeitsermittlung vorgegebener Szenarien mittels Ereignisbaumanalyse	Vorgabe von 13 Szenarien, kein Einfluss der Häufigkeit
Häufigkeits-/Ausmaßermittlung	standardisierte Häufigkeits-/Ausmaß-Matrix (semiquantitativ); Ausmaßanalyse mittels Modellen (quaritativ)	quantitative Häufigkeits- und Schadensausmaßermittlung mittels szenariobasierten Modellen	im wesentlichen qualitative Schadensausmaßermittlung Einbeziehung quantitativer Analysen ist möglich	quantitative Häufigkeits- und Schadensausmaßermittlung mittels szenariobasierten Modellen	quantitative Häufigkeits- und Schadensausmaßermittlung mittels szenariobasierten Modellen	quantitative Häufigkeits- und Schadensausmaßermittlung mittels szenariobasierten Modellen	quantitative Häufigkeits- und Schadensausmaßermittlung mittels szenariobasierten Modellen
Risikoberechnung und Risikodarstellung	qualitativ, grafische und tabellarische Ergebnisdarstellung	quantitativ; Anzahl Betroffene bzw. Anzahl getötete Personen (je nach Modell)	qualitative zeitabhängige Ereignis- und Maßnahmen-darstellung	quantitativ; Anzahl getötete Personen	quantitativ; Anzahl getötete Personen	quantitativ; Anzahl getötete Personen	quantitativ; Anzahl getötete Personen
Risikobewertung							
Kriterien	Stand der Technik, Vorgaben, Normen	Risikowerte (Erwartungswert, kollektives Risiko, Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, Summenkurve)	Ausmaßvergleich ausgewählter Szenarien	Vergleich von Risikowerten (Erwartungswert, kollektives Risiko, individuelles Risiko, Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, Summenkurve)	Vergleich von Risikowerten (Erwartungswert)	Vergleich von Risikowerten (Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, Summenkurve)	Vergleich von Risikowerten (Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm, Summenkurve)
Maßnahmenplanung und -beurteilung							
Maßnahmenwirksamkeit/Wahl von Alternativen/Nachweis gleicher Sicherheit	qualitativ, relativer Vergleich	quantitativ, relativer/ absoluter Vergleich	qualitativ, relativer Vergleich	quantitativ, relativer/ absoluter Vergleich	qualitativ, relativer Vergleich	quantitativ, relativer/ absoluter Vergleich	*)
Kostenwirksamkeit einzelner Maßnahmen	--	--	--	--	--	qualitativ, relativer Vergleich	quantitativ, relativer/ absoluter Vergleich
*) Vergleich von Tunnelroute zur Alternativrouten							

Tab. 5: Zusammenstellung der risikoorientierten Untersuchungsansätze ausgewählter Länder

wertung mittels eines relativen Vergleichs (z. B. von verschiedenen Sicherheitsmaßnahmen oder des Ist-Zustands eines Tunnels zu einem Soll-Zustand) das Vertrauen zu den aus den Resultaten gezogenen Schlussfolgerungen erhöhen kann. Die Größe der entsprechenden Unsicherheiten, die sich bei der Risikoberechnung ergeben können, sollten daher mittels einer ergänzenden Sensitivitätsanalyse dargestellt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Schwere Brandunfälle in einigen Straßentunneln der Alpenländer in den Jahren 1999 und 2001 haben aufgezeigt, dass hinsichtlich der Tunnelsicherheit noch Verbesserungsmöglichkeiten bestanden. Eine hierauf national und international – auch mit Beteiligung der BAST – geführten Diskussion über die Sicherheit in Straßentunneln mündete in europaweit

gemeinsame Mindeststandards. Den entsprechenden normativen Rahmen gibt EU-weit die „Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über Mindestanforderungen für die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ (2004/54/EG) (EG-Tunnelrichtlinie) [1] vor. In die national geltenden „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT), Ausgabe 2006 [2], sind die entsprechenden Vorgaben der EG-Tunnelrichtlinie umgesetzt worden.

Ein möglichst einheitlicher Standard insbesondere bei den Sicherheitseinrichtungen wird im Normalfall durch einen in den Regelwerken fest umrissenen und vorgegebenen Ausstattungsumfang erreicht. In besonderen Fällen ist jedoch die Notwendigkeit und der Umfang eines über dem Normalfall liegenden Ausstattungsniveaus mit ergänzenden Verfahren zu ermitteln. Hierfür, sowie zur Überprüfung der Wirksamkeit einzelner Sicherheitsmaßnahmen, werden Nachweise mittels Risikoanalysen gefordert, insbesondere:

- wenn ein Tunnel eine besondere Charakteristik aufweist,
- zum Nachweis der gleichen Sicherheit beim Einsatz anderer nicht richtlinienkonformer Sicherheitsmaßnahmen im Vergleich zur Regelausstattung z. B. aus Kostengründen (Bestand),
- zur Festlegung der Lüftungsart bei Gegenverkehrstunneln,
- für die Zulassung von Gefahrguttransport in Tunneln.

Die Art und Weise, wie diese Nachweise geführt werden sollen, liegt zunächst in der Verantwortung desjenigen Staates, in dem sich die Tunnel befinden.

Aus den Regelwerksvorgaben kann als Zielsetzung von Risikoanalysen einerseits abgeleitet werden, dass mit der Berücksichtigung tunnelspezifischer Randbedingungen eine größere Flexibilität bei der Zusammenstellung eines über den Mindeststandards liegenden Maßnahmenumfanges erreicht werden kann. Zum anderen soll aber auch die Wirkung verschiedener Maßnahmen auf das Risiko sowie die Kosten einer Maßnahme und die daraus resultierende Risikominderung ermittelt werden können.

Weder die EG-Tunnelrichtlinie [1] noch die RABT 2006 [2] differenzieren zwischen unterschiedlichen

„Arten“ von Risikoanalysen, sei es zur Ermittlung der Tunnelausstattung bei Tunneln mit „besonderer Charakteristik“ oder bei der Zulassung von Gefahrgut. Andererseits sehen beide Regelwerke den verbindlichen Einbau von Ausstattungselementen (z. B. Schlitzrinnen mit Rückhalteeinrichtungen, Lüftungssysteme) für einen sicheren Transport von Gefahrgütern durch Straßentunnel vor.

Seit der Einführung der RABT 2006 [2] hat die Anwendung der Vorgaben im Hinblick auf den Anlass einer Risikoanalyse als auch den in Abhängigkeit vom Anlass zu betreibenden Untersuchungsaufwand teilweise zu Unsicherheiten bei der Durchführung von Risikoanalysen geführt. Dies kann einerseits in der Wahl lediglich eines Begriffs („Risikoanalyse“) zur Untersuchung inhaltlich unterschiedlicher Sachverhalte, andererseits auch aufgrund des in den Regelwerken nicht erläuterten Vorgehens zur Durchführung des Verfahrens liegen.

Aus vereinzelt methodischen Hinweisen untersuchter Regelwerke lässt sich im Hinblick auf eine anzustrebende risikoanalytische Untersuchungsmethodik eine Tendenz hin zu denjenigen methodischen Ansätzen erkennen, die eine transparente Ergebnisdarstellung durch definierte Berechnungsabläufe oder die Nachbildung szenariogestützter Ereignisabläufe leisten können. Von den zur Durchführung von risikobezogenen Untersuchungen in Frage kommenden Modellen und Methodikbausteinen sind hierfür in besonderem Maß die quantitativen Methoden in der Lage.

Im Bericht wird auf die wichtigsten Aspekte und Methoden, die im Zusammenhang mit der Durchführung risikobezogener Untersuchungen stehen, eingegangen. Eine Unterscheidungsmöglichkeit vorhandener Methoden wird hinsichtlich qualitativer und quantitativer Methoden vorgenommen. Mit den Methoden korrespondierende Verfahren hinsichtlich Ermittlung, Auswertung und Bewertung von Daten werden nach empirischen, maßnahmenorientierten und risikoorientierten Ansätzen differenziert.

Auf der Basis der vorgenommenen Zusammenstellung von normativen und methodischen Vorgaben aus Regelwerken und Richtlinien sowie von Methoden, Ansätzen und Modellen wird ein mögliches Vorgehen für eine risikoanalytische Untersuchung von Straßentunneln dargestellt. Es basiert auf einem risikoorientierten Ansatz. Dieser besteht aus

den Einzelschritten Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung/-beurteilung.

Bei der Risikoanalyse werden mögliche Ereignisse und deren Abläufe bestimmt. Das Risiko ist dabei eine Aussage über die Zukunft und setzt sich aus den zwei Komponenten „Häufigkeit des Eintritts“ und „Größe der Auswirkungen beim Eintritt“ zusammen. Rechnerisch ist das Risiko gleich der Häufigkeit des Eintritts mal der Größe der Auswirkungen. Die Risikoanalyse versucht vereinfacht die Frage zu beantworten: „Was kann wie oft passieren und was sind die Folgen?“

In der sich anschließenden Risikobewertung wird die Entscheidung getroffen, ob und welche Risikominimierungen vorgenommen werden müssen. Hier wird die Frage versucht zu klären: „Was darf wie oft passieren?“

Die Maßnahmenplanung umfasst die Ermittlung und Beurteilung risikominimierender Maßnahmen auch im Zusammenhang mit den hierbei entstehenden Kosten. Beantwortet werden soll die Frage: „Welche Maßnahmen müssen für eine ausreichende Sicherheit des Systems getroffen werden?“

Einschränkungen bei der praktischen Anwendung ergeben sich durch die noch schmale Datenbasis bei Ereignis- und Versagenshäufigkeiten betriebstechnischer Ausstattungselemente oder verkehrlicher Störfälle, deren Erweiterung vorgesehen ist. Eine Häufigkeits-/Ausmaßermittlung und eine darauf fußende Risikoberechnung ist daher für den Bereich Straßentunnel noch mit Unsicherheiten behaftet, so dass die Ergebnisse einer entsprechenden Untersuchung als Größenangabe oder Tendenz, bzw. als ein zwar exaktes, jedoch mit Unschärfen behaftetes Resultat gewertet werden müssen.

Die Wahl der Methoden erfolgt, indem die zu erwartenden Vorzüge und Nachteile im Hinblick auf die Beantwortung einer spezifischen Fragestellung abgewogen werden. Die am besten geeignete Methode zur Untersuchung des fraglichen Sachverhalts zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass mit ihr das zu Grunde liegende Problem erfasst, der für die Untersuchung erforderliche Tiefgang erreicht und die zur Verfügung stehenden Ressourcen eingehalten werden. Es ist zu berücksichtigen, dass quantitative Methoden wie z. B. Simulationen oder statistische Auswertungen im Normalfall vielschichtiger und umfangreicher und deshalb mehr Aufwand als qualitative Untersuchungen, wie z. B. Expertenschätzungen oder Checklistenverfahren, er-

fordern. Weiterhin benötigen quantitative Methoden spezielle angepasste (quantitative) Eingangsdaten, die entweder nicht oder nicht in der erforderlichen Güte vorhanden sind. Darüber hinaus kann zwischen den einzelnen Methoden insbesondere dann nicht mehr willkürlich gewählt werden, wenn Elemente innerhalb der Risikobewertung zwingend auf eine spezielle Ergebnisdarstellung aus der Risikoanalyse angewiesen sind.

In der Praxis werden zur Bearbeitung objektspezifischer Fragestellungen meist mehrere verschiedene Methoden gewählt und oftmals auch so miteinander kombiniert, dass eine genaue Abgrenzung untereinander nicht mehr möglich ist. Als Beispiel kann die Verbindung aus Expertenannahmen und/oder -schätzungen genannt werden, auf die oftmals im Zusammenhang mit quantitativen Berechnungen zurückgegriffen wird, um einen Mangel an Daten für eine statistische Analyse auszugleichen.

Für die innerhalb einer risikobezogenen Untersuchung abzuarbeitenden Schritte Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung steht eine große Bandbreite qualitativer und quantitativer Methoden bzw. Modelle zur Verfügung. Die Darstellung der in einzelnen Ländern durchgeführten Praxis zeigt auf, dass eine Kombination der unterschiedlichen Verfahren verwendet wird, jedoch kann keine der für die Risikoanalyse verwendeten Methoden bzw. Methodenkombinationen als ein Optimum sowohl im Hinblick auf die Eindeutigkeit der Ergebnisse als auch des zu betreibenden Aufwandes bei der Durchführung bezeichnet werden.

Während die eigentliche Risikoanalyse über die Höhe der Risiken Auskunft gibt, wird im Rahmen der Risikobewertung die jeweilige Akzeptanz der ermittelten Risiken bestimmt. Diese kann entweder durch Vergleich des für ein System ermittelten Risikoerwartungswertes mit einem vorgegebenen Wert absolut oder in Form eines Vergleiches der Risikowerte aufgrund unterschiedlicher getroffener Maßnahmen relativ erfolgen. Mit einem relativen und maßnahmenorientierten Bewertungsansatz wird jedoch kein einheitliches Sicherheitsniveau definiert, da aufgrund objektspezifischer Randbedingungen für verschiedene Tunnel auch bei richtlinienkonformer Ausstattung unterschiedliche Risiken auftreten können.

Im Rahmen dieser Ausarbeitung ist die Frage der Risikobewertung lediglich aus dem Blickwinkel von hierfür erforderlichen und geeigneten risikobezogenen Methoden als notwendige Vorarbeit für die

Durchführung einer Risikobewertung betrachtet worden. Die Probleme, Möglichkeiten aber auch Einschränkungen in Abhängigkeit von verschiedenen Strategien sind nicht Gegenstand dieser Ausarbeitung, sollten jedoch zu einem späteren Zeitpunkt und bei Vorliegen von weiteren Erfahrungen detailliert diskutiert werden. Die Auswahl geeigneter Strategien für die Risikobewertung hängt nicht zuletzt auch von den jeweiligen nationalen Regelungen ab.

Die risikobezogenen Untersuchungen für Gefahrgüter, die eine Entscheidungsgrundlage für die Genehmigung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel (Kategorisierung gemäß ADR), bilden, werden im Rahmen dieser Ausarbeitung aufgrund ihres Bezugs zu Artikel 13 der EG-Tunnelrichtlinie kurz angesprochen, bilden hier jedoch keinen Schwerpunkt. Für die Durchführung von Risikoanalysen im Zusammenhang mit dem Transport von Gefahrgut durch Straßentunnel wurde durch OECD/PIARC ein „Quantitatives Risikoanalyse-Modell“ (QRA) entwickelt. Dieses Modell wird in einigen Mitgliedsstaaten (z. B. Frankreich oder Großbritannien) standardmäßig, in Deutschland inzwischen vereinzelt eingesetzt.

Es kann erwartet werden, dass in naher Zukunft Risikoanalysen in einer Vielzahl von Ländern ein verbreitetes Hilfsmittel zur Durchführung risikobezogener Untersuchungen für Straßentunnel sein werden. Zur gleichen Zeit wird die Erfahrung mit der Durchführung dieser Analysen und die Notwendigkeit eines Erfahrungsaustauschs auf internationaler Ebene zunehmen. Dieser Prozess sollte eine kontinuierliche Fortschreibung bestehender und Entwicklung neuer Methoden und Modelle zur Folge haben.

Neben der Anwendung risikobezogener Verfahren stellt die EG-Tunnelrichtlinie auch Vorgaben im Hinblick auf eine systematische Erfassung und Auswertung von Unfällen und sonstigen Störfällen in Straßentunneln auf. In Zukunft sollte somit auch eine vollständigere und aussagekräftigere Datengrundlage als heute zur Verfügung stehen.

So weit es die Forschung und die Weiterentwicklung von Methoden betrifft, sollten sich die Anstrengungen auf die folgenden Kernpunkte konzentrieren:

- die Entwicklung und Harmonisierung hin zu allgemein anwendbaren Richtlinien zur Durchführung von Risikoanalysen für Straßentunnel

sowie die Normierung einiger spezifischer Elemente der Risikoanalyse,

- Verbreiterung des Untersuchungsansatzes zur Risikodarstellung und Konzeption eines Verfahrens zur Risikobewertung von Straßentunneln einschließlich Empfehlungen für seine Anwendung.
- Um die Vorteile einer quantitativen Risikoanalyse mittel- bis längerfristig besser nutzen zu können, ist die weitere Erhebung und Auswertung betrieblicher und verkehrlicher Störfälle in Tunneln anzustreben. Hierdurch sollen auch Erkenntnisse gewonnen werden, wie sich Ereignisse aber auch als Reaktion darauf getroffene Einzelmaßnahmen auf die Sicherheit des Gesamtsystems auswirken.

Literatur

- [1] Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, ABl L 167 vom 30.04.2004, S. 39-91; berichtigte Fassung ABl. L 201 vom 07.06.2004, S. 56-76
- [2] Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2006; FGSV-Verlag, Köln, 2006
- [3] Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln; Entwurf des Schlussberichts zum Forschungsvorhaben FE 03.378/2004/FRB BMVBS/BAS (unveröffentlicht)
- [4] Technical Report „Risk Analysis for Road Tunnels“, Version April 2007; PIARC, Technical Committee C3.3 WG 2 (non-published)
- [5] Straßenverkehrsordnung (StVO) in der jeweils gültigen Fassung,
- [6] Verwaltungsverordnung zur Straßenverkehrsordnung (VwV-StVO)) in der jeweils gültigen Fassung.
- [7] Straßentunnelsicherheitsgesetz (STSG) vom 29.03.2006, BGBl I Nr. 54/2006 vom 8. Mai 2006
- [8] Guide to Road Tunnel Safety Documentation, Booklet 4, 2003
- [9] Projektierungsrichtlinien, Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 09.03.11:

Tunnel-Risikoanalysemodell, Entwurf 2006
(unveröffentlicht)

- [10] Projektierungsrichtlinien, Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) 09.02.31 (alt 9.621): Lüftungsanlagen, Grundlagen, Ausgabe vom 01.0.2001, FSV-Verlag, Wien
- [11] Harmonised risk assessment; SafeT, Work package 5, Task 5.1; TNO, 17.12.2004; www.mep.tno.nl/SAFET/PDF/D5_1_SafeT_task_5_1_report_Harmonised_Risk_Assessment_second_draft.pdf (10.06.2007)
- [12] OECD/PIARC: Safety in Tunnels: Transport of dangerous goods through road tunnels; OECD 2001; ISBN 92-64-19651-x
- [13] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Handbuch I zur Störfallverordnung StFV; Bern (1991) und: Beurteilungskriterien II zur Störfallverordnung StFV – Richtlinien für Verkehrswege; Bern, 2001
- [14] RIDDER, HOLZHÄUSER: ADR 2007; Ecomed Sicherheit; Landsberg 2007; ISBN-13: 978-3-609-69559-4

Schriftenreihe**Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen****Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“****1993**

- B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen
Budnik, Laakkonen, Maaß, Großmann vergriffen
- B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/BT 700
Haser kostenlos
- B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken
Knabenschuh vergriffen
- B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttproben
MES-93 € 9,00

1994

- B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen
Bundesländern
von H. Hase, R. Kaschner
Teil 1: Nachrechnung von Gewölbebrücken
Teil 2: Schubsicherung bei Fertigteilträgern BT 70 und BT 50
Haser, Kaschner € 11,50

1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbahnbelägen für
Brücken
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahn-
platte
Krieger, Rat € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmetho-
den bei Beton-
brücken
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln
Maaß, Krieger € 12,50

1996

- B 11: Fahrbahnbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkir-
chener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbahnübergängen aus Asphalt infolge Ho-
rizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim
Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brük-
kenseile
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe
und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmetho-
den für Betonbrücken
Krieger € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Be-
schichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Inge-
nieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Un-
tergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-
beläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von
Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-
prüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen
Dünnbelegen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-
arme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-
kategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen
Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahn-
beläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Tal-
brücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00

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-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 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: 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 Brückenseilen 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, Gardei, 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-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck in Vorbereitung

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
Expositionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig 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 kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

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

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.