

**Verfahren zur  
Kategorisierung von  
Straßentunneln gemäß  
ADR 2007**

**Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**bast**

# Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007

FE 03.0437/2007/FRB  
FE 86.0050/2008

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)  
im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr,  
Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)  
und der Länder

BUNG Ingenieure AG

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baltzer  
Dipl.-Ing. Werner Riepe  
Dipl.-Ing. Uwe Zimmermann

Ernst Basler + Partner

Dipl.-Ing. ETH Christoph Zulauf  
Dipl.-Ing. ETH Dominique Imhof

Planung Transport Verkehr AG (PTV)

Dr.-Ing. Georg Mayer

Kurzbericht  
März 2009



## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung und Ausgangslage</b>	<b>1</b>
1.1 Risiken von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel	1
1.2 Regulative Forderungen	1
1.3 Umsetzung in Deutschland	2
<b>2 Risikoanalysen für Gefahrguttransporte durch Straßentunnel</b>	<b>2</b>
<b>3 Risikobasiertes Verfahren zur Umsetzung der ADR-Forderungen für Tunnel in Deutschland</b>	<b>2</b>
3.1 Übersicht zum Verfahren	2
3.2 Stufe 1a: Grobselektion	3
3.3 Stufe 1b: Ermittlung des intrinsischen Risikos anhand des OECD/PIARC QRA Modells	3
3.4 Stufe 2a: Vertiefte Analyse des intrinsischen Risiko des Tunnels	4
3.5 Stufe 2b: Überprüfung der Risiken auf Umfahungsstrecken	6
<b>4 Schlussfolgerungen</b>	<b>6</b>



## Zusammenfassung

Zur Beurteilung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel und zur Festlegung etwaiger Transportbeschränkungen sind gemäß geltenden Vorschriften risikobasierte Untersuchungen vorzunehmen. Im Rahmen eines Forschungsprojektes einer Bund-/Länderarbeitsgruppe wurde unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt ein mehrstufiges Verfahren entwickelt, anhand dessen die Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter durch Straßentunnel analysiert und beurteilt sowie der Bedarf nach Transportbeschränkungen ermittelt werden können. Das entwickelte Verfahren ist ein Hilfsmittel, das einen einheitlichen Umgang mit der Thematik ermöglichen soll. Die Initiative und diese Herangehensweise wurden auf der Verkehrsministerkonferenz vom Oktober 2007 für Deutschland beschlossen.

## 1 Einleitung und Ausgangslage

### 1.1 Risiken von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel

Vor dem Hintergrund verschiedener schwerer Unfälle in Straßentunneln wurde in den vergangenen Jahren die Frage nach möglichen Risiken bei einer möglichen Beteiligung von Gefahrgütern verstärkt diskutiert. Freisetzungen von Gefahrgut sind zwar erfahrungsgemäß sehr seltene Ereignisse, aufgrund der spezifischen Eigenschaften der Gefahrgüter können sie aber ein erheblich größeres Schadenpotenzial aufweisen, als etwa "herkömmliche" Tunnelbrände.

### 1.2 Regulative Forderungen

Auf Seiten der regulativen Forderungen sind in der jüngeren Vergangenheit bedeutende Neuerungen im Zusammenhang mit dem Transport von Gefahrgütern durch Straßentunnel erfolgt:

- *ADR 2007/2009* [ADR 2007],[ADR 2009]: Das Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR) regelt auf europäischer Ebene die Grundsätze zum Transport von Gefahrgut auf der Straße und bezeichnet die zugehörigen Vorschriften. In der Fassung des ADR von 2007 wurden neue Bestimmungen für Straßentunnel eingeführt. Sie verlangen eine einheitliche Regelung und Kennzeichnung bei Durchfahrtsbeschränkungen von Gefahrguttransporten durch Tunnel. Etwaige Beschränkungen sollen auf einer Risikoanalyse abgestützt werden und die Tunnel – je nach Grad der resultierenden Transportbeschränkung – bis zum 31.12.2009 einer Tunnelkategorie A bis E zugeordnet werden (vgl. Bild 1). Folgende Wirkungsarten von Gefahrguttransporten sind gemäß ADR aus Blickwinkel der (Personen-)Risiken zu berücksichtigen:
  - Explosions-/Druckwirkung
  - Toxizität
  - Brandwirkung
- *Tunnelrichtlinie 2004/54/EG* [EG 2004]: Gemäß der Tunnelrichtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz (TERN) ist für alle Tunnel mit einer Länge von mindestens 500 m, die innerhalb des TERN liegen, vor der Festlegung bzw. Änderungen der Vorschriften bezüglich Gefahrguttransporten eine Risikoanalyse gemäß Artikel 13 durchzuführen. Die Umsetzung der Richtlinie für in Betrieb genommene Tunnel hat bis zum 30.04.2014 zu erfolgen.
- *RABT 2006* [RABT 2006]: In den Deutschen "Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln" (RABT 2006) ist geregelt, dass für alle Tunnel mit einer Länge ab 400 m Risikoanalysen durchzuführen sind, wenn Festlegungen bzw. Änderungen der Vorschriften bzgl. Gefahrguttransporte vorgenommen werden. Bei Vorhandensein von Umfahrgestrecken sind diese in das Risikoanalyseverfahren einzubeziehen. Darüber hinaus sind beim Vorliegen einer besonderen Charakteristik des Tunnels hinsichtlich der Gefahrguttransporte ebenfalls Risikoanalysen gefordert.

Tunnel-kategorie ADR	Beschränkung
A	keine Beschränkung für gefährliche Güter (UN 2919 und 3331, siehe ADR, Abs. 8.6.3.1)
B	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer sehr grossen Explosion führen können
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr grossen Explosion</li> <li>▪ grossen Explosion</li> <li>▪ Umfangreiches Freiwerden giftiger Stoffe führen können</li> </ul>
D	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr grossen Explosion</li> <li>▪ grossen Explosion</li> <li>▪ Umfangreiches Freiwerden giftiger Stoff</li> <li>▪ grossen Brand</li> </ul> führen können
E	Beschränkungen für alle gefährlichen Güter (ausser UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 and 3373)

Tab. 1: Tunnelkategorien nach ADR<sup>1</sup>

### 1.3 Umsetzung in Deutschland

Mit den genannten Vorschriften und Richtlinien ergibt sich zur Erlangung einer Rechtssicherheit bei eventuellen Durchfahrtsbeschränkungen für Gefahrguttransporte der Bedarf einer bundeseinheitlichen Anwendungsregelung. Diese soll unabhängig von der Tunnellänge und dem Baulastträger für alle neuen und im Bestand befindlichen Tunnel gelten.

## 2 Risikoanalysen für Gefahrguttransporte durch Straßentunnel

In der Vergangenheit wurde verschiedentlich, oft ohne auf eine spezifische Risikountersuchung zurückgreifen zu können, anhand pauschaler Einschätzungen über ein generelles Verbot oder

<sup>1</sup> Es gilt darauf hinzuweisen, dass die Einteilung der Tunnelkategorien nach ADR streng genommen nicht auf einer risikobasierten Betrachtung basiert sondern auf einer Betrachtung der Schadenpotenziale, d. h. ohne Berücksichtigung der wahrscheinlichen Häufigkeit der betrachteten Schäden.

eine grundsätzliche Zulassung von Gefahrguttransporten durch Tunnel entschieden. Solche Entscheidungen sind oft maßgeblich beeinflusst von subjektiv geprägten Grundhaltungen, die von Verantwortungsträgern und Beteiligten eingebracht werden. Zudem standen einheitlich anerkannte Verfahren für eine risikobasierte Bewertung nur eingeschränkt zur Verfügung und das Vorgehen zur Entscheidungsfindung war nicht geregelt.

Für die Untersuchung von Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch Straßentunnel liegen heute verschiedene Methoden und Anwendungserfahrungen im In- und Ausland vor. Das Spektrum der angewandten Methoden ist sehr breit und reicht von Experteneinschätzungen, bei denen die Risiken von Gefahrguttransporten durch einen Tunnel qualitativ beurteilt werden, über andere qualitative und semiquantitative Verfahren bis hin zu rein quantitativen Verfahren.

Qualitative und vereinfachte quantitative Verfahren können die komplexen Interaktionen zwischen Tunnel, Tunnelnutzern, Sicherheitsausstattung und Gefahrgutwirkungen nur bedingt erfassen. Um die komplexen Zusammenhänge hinreichend abbilden zu können, haben sich in der Praxis vorwiegend quantitative Verfahren durchgesetzt. Durch die Quantifizierung werden die erforderlichen Annahmen und Modellparameter transparent dargelegt. Maßnahmen auf Basis von quantitativen Risikoanalysen haben so den Vorteil, dass sie auf einer objektivierbaren und diskutierbaren Grundlage basieren, auch wenn für die Bewertung der Tragbarkeit von Risiken durchaus Ermessensspielräume bestehen.

## 3 Risikobasiertes Verfahren zur Umsetzung der ADR-Forderungen für Tunnel in Deutschland

### 3.1 Übersicht zum Verfahren

Im Rahmen eines Forschungsprojektes einer Bund-/Länderarbeitsgruppe wurde unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt im Zeitraum von Februar 2008 bis März 2009 ein Vorschlag für ein risikobasiertes, mehrstufiges Verfahren entwickelt, mit dem Straßentunnel einer Tunnelkategorie nach ADR 2007 zugeordnet werden können [ADR 2007]. Eine schematische Übersicht zum Verfahren ist in der nachfolgendem Bild 1 dargestellt.

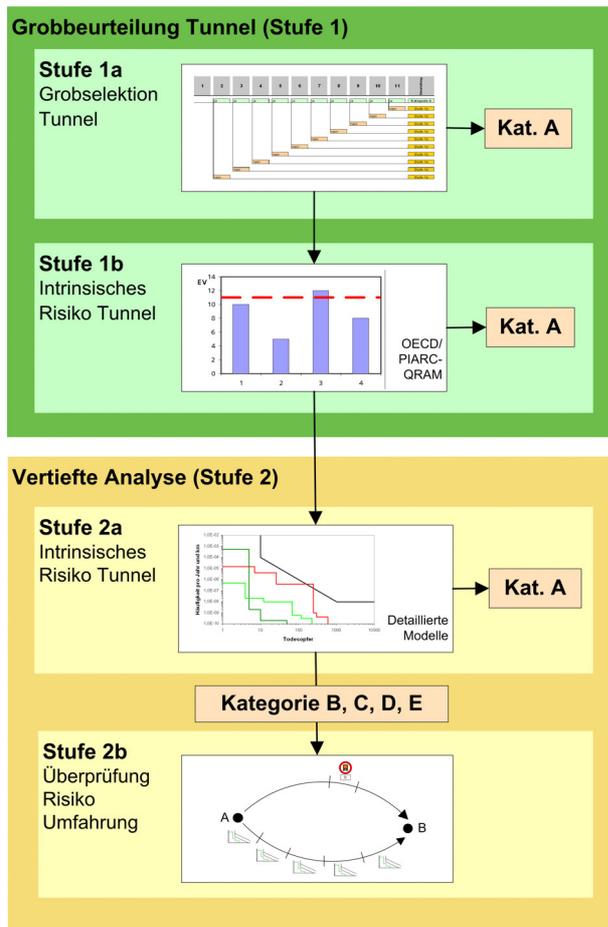


Bild 1: Verfahrensablauf - Schema

Das Verfahren ist mehrstufig aufgebaut und gliedert sich in eine Grobbeurteilung (Stufe 1) und eine vertiefte Analyse (Stufe 2), die wiederum in zwei Substufen unterteilt sind:

- Stufe 1a: Grobselektion
- Stufe 1b: Ermittlung des intrinsischen Risiko anhand des OECD/PIARC QRA Modells
- Stufe 2a: Vertiefte Analyse des intrinsischen Risiko des Tunnels mit detaillierten Modellen
- Stufe 2b: Überprüfung der Risiken auf einer Umfahungsstrecke

### 3.2 Stufe 1a: Grobselektion

In der Stufe 1a des Verfahrens werden risikorelevante, charakteristische Kenngrößen des zu untersuchenden Tunnels wie beispielsweise Länge, Längsneigung, Sicherheitsausstattung oder Angaben zum Verkehr überprüft (vgl. Entscheidungsbaum in Bild 2).

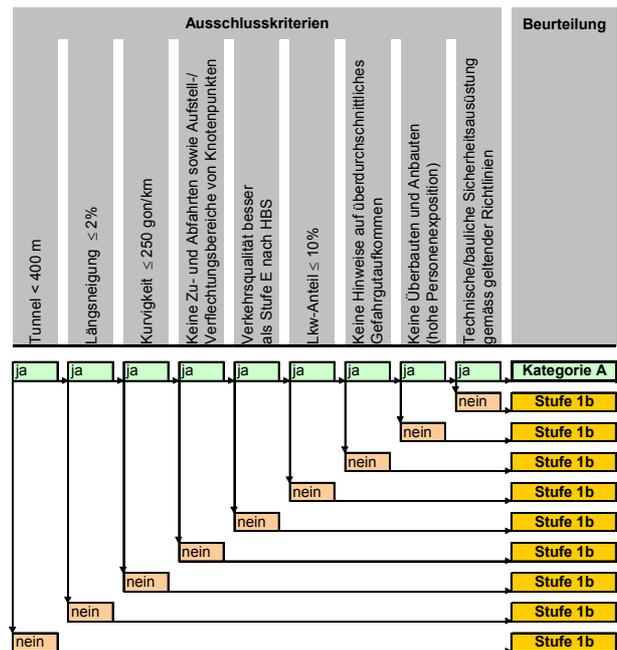


Bild 2: Stufe 1a - Kenngrößenverfahren

Liegen alle Kenngrößen unterhalb der definierten Schwellenwerte, so können Gefahrguttransporte uneingeschränkt durch den Tunnel zugelassen bzw. der Tunnel der Kategorie A gemäß ADR zugeordnet werden. Andernfalls sind weitergehende Abklärungen zur Ermittlung der Risiken bzw. des Bedarfs nach etwaigen Transportbeschränkungen erforderlich (Stufe 1b des Verfahrens).

Die Überprüfung der Tunnel-Kenngrößen basiert auf einer sehr pragmatischen Vorgehensweise, die mit geringem Aufwand ohne vertiefte Kenntnisse zu Risikoanalysen durchgeführt werden kann. Die Festlegung der zu berücksichtigenden Kenngrößen sowie der Schwellenwerte wurde aus Erkenntnissen und Erfahrungen aus verschiedenen bereits durchgeführten detaillierten Risikoanalysen abgeleitet. Weist der Tunnel eine Charakteristik auf, die ggf. sicherheitsrelevant ist aber durch die Grobselektion nicht berücksichtigt wird, ist der Tunnel in einer der nächsten Stufen zu untersuchen, mit der die Besonderheiten abgebildet werden können

### 3.3 Stufe 1b: Ermittlung des intrinsischen Risikos anhand des OECD/PIARC QRA Modells

In der Stufe 1b des Verfahrens werden die Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter für den jeweiligen Tunnel anhand einer kommerziellen

Software, dem OECD/PIARC<sup>2</sup> QRA Modell, quantitativ ermittelt [INER 2005b]. Mit Hilfe dieses Modells können standardmässig die resultierenden Risiken für 13 Szenarien (davon elf Gefahrgutszenarien) quantifiziert werden (vgl. Tab. 2).

Nr.	Szenario
1	Brand eines Schwerverkehrfahrzeuges, 20 MW
2	Brand eines Schwerverkehrfahrzeuges, 100 MW
3	BLEVE <sup>3</sup> einer 50 kg-Propangasflasche
4	Lachenbrand von 28 t freigesetztem Treibstoff
5	Gaswolkenexplosion freigesetzter Treibstoffdämpfe, Freisetzung 28 t
6	Austreten giftiger Gase aus einem Chlortank (20 t)
7	BLEVE von 18 t Propangastank
8	Gaswolkenexplosion von ausgetretenem Propan aus 18 t Gastank
9	Freistrahbrand von unter Druck austretendem Propan aus 18 t Gastank
10	Freisetzung von 18 t Ammoniak aus einem Tank
11	Freisetzung von Acrolein aus einem 25 t Tank
12	Freisetzung von Acrolein 100 l aus Flaschen
13	Druckwirkung einer Gasexplosion von 20 t verflüssigtem CO <sub>2</sub> („kalter BLEVE“)

Tab. 2: Szenarien des OECD/PIARC QRA Modells<sup>4</sup>

Das OECD/PIARC QRA Modell ist verhältnismässig einfach handhabbar und wird heute bereits in verschiedenen Ländern angewandt. Wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, werden die Risiken mit dem vorliegenden Standard-Modell teilweise sehr konservativ bewertet. Dies ist zum einem darauf zurück zu führen, dass das Modell bewusst von konservativen (worst case) Betrachtungen ausgeht, zum anderen können die in der Software hinterleg-

ten Ausbreitungsmodelle die komplexen spezifischen Tunnelcharakteristika nur begrenzt abbilden. Für die Zwecke der Grobanalyse steht mit dem Modell jedoch ein sinnvolles Hilfsmittel zur Verfügung.

Zur Anwendung im vorliegenden Verfahren wurden im Rahmen des Forschungsprojektes spezifische Vorgaben zum einheitlichen Umgang vorgeschlagen. Ferner wurden Schwellenwerte für die mit dem Modell ermittelten Schadenerwartungswerte (kollektive Risiken) empfohlen, bei deren Unterschreitung auf eine weitere Untersuchung des Tunnels verzichtet werden kann und eine Beschränkung von Gefahrguttransporten nicht erforderlich ist. Der Tunnel kann in diesen Fällen der Kategorie A gemäß ADR zugeordnet werden.

### 3.4 Stufe 2a: Vertiefte Analyse des intrinsischen Risiko des Tunnels

Zeigt sich, dass für einen zu untersuchenden Tunnel auf Basis der Grobbeurteilung (Stufen 1a und 1b) keine Freigabe für Gefahrguttransporte abgeleitet werden kann, werden im Zuge vertiefender Analysen die Risiken detaillierter ermittelt und die gegebenenfalls erforderlichen Beschränkungen nach ADR bestimmt. Um die Freisetzungsvorgänge und die Wirkungsmechanismen eines Gefahrstoffes nach dessen Freisetzung im Tunnel detaillierter abbilden zu können, wurde auf Basis bereits vorliegender Studien eine spezifische Methode entwickelt. Dabei kommen zur Ausmaßermittlung hoch auflösende Strömungs- und Ausbreitungs-, Wirkungs-, Flucht- und Evakuierungs- sowie bei Bedarf Verkehrsflussmodelle zum Einsatz.

Das Spektrum der transportierten Gefahrgüter und der verschiedenen Wirkarten sowie der transportierten Mengen und Transportbinde ist ausgesprochen breit und kann im Rahmen einer Risikoanalyse nicht vollumfänglich abgedeckt werden. Aus diesem Grund wurden mittels repräsentativer Stoffe – so genannter Leitstoffe – die maßgebenden Gefahrgutwirkungen (Explosions-/Druckwirkungen, Toxizität und Brandwirkungen) abgebildet und zugehörige Ereignisszenarien definiert (vgl. Tab. 3). Die Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und Trinitrotoluol stehen dabei stellvertretend für alle Stoffe, deren zu berücksichtigende charakteristische Gefahrgutwirkung vergleichbar ist:

<sup>2</sup> OECD: Organisation for Economic Cooperation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung); PIARC: Weltstrassenverband

<sup>3</sup> Unter einem BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) versteht man den Vorgang, der durch schlagartiges Entzünden nach einer Freisetzung infolge Behälterbersten durch grosse mechanische Einwirkung oder Hitzeeinwirkung erfolgt.

<sup>4</sup> Bei den Szenarien 1 und 2 handelt es sich um Brände von Schwerverkehrsfahrzeugen ohne Beteiligung von Gefahrgut, die in der Stufe 1b nicht berücksichtigt werden.

Leitstoff	Nr.	Szenario	Menge	Wirkung
Benzin	1	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 20 m <sup>3</sup> .	15 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Lachenbrand</li> <li>▪ Lachenbildung, verzögerte Zündung</li> <li>▪ Rauchgasausbreitung</li> </ul>
	2	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 10 m <sup>3</sup> .	8 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Lachenbrand</li> <li>▪ Lachenbildung, verzögerte Zündung</li> <li>▪ Rauchgasausbreitung</li> </ul>
Propan	3	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s bzw. 30 kg/s.	12 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und BLEVE</li> <li>▪ Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand</li> </ul>
	4	Transport in Kleingebinden, spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s bzw. 30 kg/s.	1 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und BLEVE</li> <li>▪ Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand</li> </ul>
Chlor	5	Tanktransport; spontane Freisetzung von 4 t	4 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen</li> </ul>
	6	Transport in Kleingebinden (Gesamtmenge < 50kg); spontane Freisetzung	50 kg <sup>5</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen</li> </ul>
TNT	7	Transport von 1.000 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	1 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)</li> </ul>
	8	Transport von 100 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	100 kg	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)</li> </ul>

**Tab. 3:** Zu untersuchende Szenarien der Stufe 2 des Verfahrens

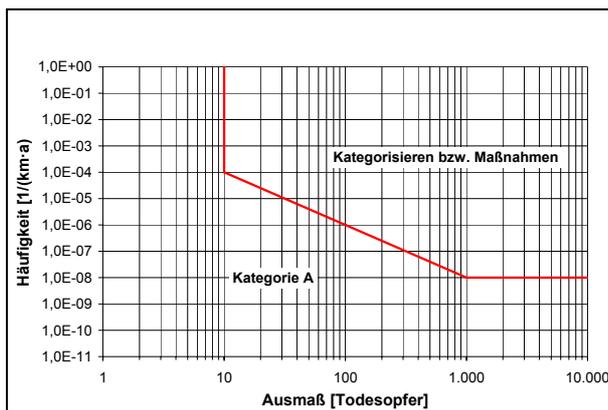
Die gewählten Leitstoffe und Szenarien weichen teilweise von denjenigen des für die Stufe 1b des Verfahrens verwendeten OECD/PIARC QRA Modells ab. Zum einen werden die im OECD/PIARC QRA Modell verwendeten Stoffe zur Abbildung der toxischen Wirkung (Acrolein, Ammoniak, Chlor) vereinfachend unter dem Leitstoff Chlor zusammengefasst. Zum anderen werden Druckwirkungen infolge Explosion anstelle von CO<sub>2</sub>, welches sich nur bedingt zur Abbildung von Explosionswirkungen eignet, mit dem Leitstoff TNT abgebildet.

Die Leitstoffe und die Szenarien sowie die berücksichtigten Freisetzungsmengen wurden so gewählt, dass die Tunnelkategorien gemäß ADR sinnvoll abgebildet werden. Die Risiken, welche sich aus dem zugelassenen Gefahrguttransport für einen Tunnel einer bestimmten Kategorie nach ADR ergeben, lassen sich durch Kombination der für die

<sup>5</sup> Vereinfachend wird von einer Freisetzungsmenge von 50 kg des Leitstoffes ausgegangen.

betreffende Tunnelkategorie maßgebenden Szenarien ermitteln. Für die Ermittlung der leitstoffspezifischen risikobestimmenden Häufigkeiten und Schadenausmaße wurden im entwickelten Verfahren Vorgaben wie beispielweise die Struktur von Ereignisbäumen oder zu berücksichtigende Einflussgrößen vorgeschlagen sowie Anforderungen an die Modelle und deren Detaillierungsgrad für die Wirkungs- und Ausmaßermittlung definiert.

Um den Handlungsbedarf hinsichtlich etwaiger Beschränkungen von Gefahrguttransporten zu ermitteln und gegebenenfalls eine Kategorisierung des Tunnels gemäß ADR vornehmen zu können, wurde zur Beurteilung eine so genannte Vergleichskurve vorgeschlagen. Anhand der in Form von Summenkurven in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm dargestellten Risiken und der Vergleichskurve kann die jeweils erforderliche Kategorie nach ADR ermittelt werden (vgl. rote Kurve in Bild 3).



**Bild 3:** Vergleichskurve zur Festlegung der Tunnelkategorie nach ADR

### 3.5 Stufe 2b: Überprüfung der Risiken auf Umfahrungsstrecken

Zeigt die Analyse und Bewertung der Risiken gemäß Stufe 2a, dass eine Beschränkung für den zu untersuchenden Tunnel erforderlich ist, so ist nach den Vorgaben von ADR eine Umfahrungsstrecke für den entsprechenden Gefahrguttransport festzulegen. Im Rahmen der Stufe 2b des Verfahrens werden deshalb die resultierenden Risiken für die Umfahrungsstrecke bei einer etwaigen Transportbeschränkung für einen Tunnel untersucht. Das Vorgehen gliedert sich in zwei Schritte:

- Untersuchung der Charakteristik der Umfahrungsstrecke hinsichtlich der risikorelevanten Einflussgrößen und Gliederung der Umfahrungsstrecke in einzelne Untersuchungseinheiten
- Analyse und Bewertung der Risiken für die Untersuchungseinheiten

Analog zum Vorgehen für Tunnelstrecken wurden im Verfahren Vorgaben und zu berücksichtigende Einflussfaktoren vorgeschlagen, welche bei der Ermittlung der Risiken für eine Umfahrungsstrecke einzubeziehen sind. Dies sind beispielsweise Anhaltspunkte zu Verzweigungspunkten in Ereignisbäumen und der Quantifizierung der zugehörigen Wahrscheinlichkeiten oder Anforderungen an Modelle zu Schadenausmaßermittlung.

Die Beurteilung der ermittelten Risiken für die Umfahrungsstrecke erfolgt – mit Ausnahme des Aspektes der Kategorisierung – analog zum Bewertungsverfahren wie es für Tunnel durchzuführen ist.<sup>6</sup> Dabei wird wiederum dieselbe Vergleichskurve im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm verwendet wie für die Tunnel (vgl. auch Bild 3). Liegt die Summenkurve für die resultierenden Gesamtrisiken aus dem u. U. bereits vorliegenden Gefahrguttransport sowie dem zusätzlichen durch die Kategorisierung des Tunnels nach ADR umgelagerten Gefahrguttransport über der Vergleichslinie, so ist die Umfahrungsstrecke aus Blickwinkel der Risiken nicht geeignet und es ist eine andere Umfahrungsstrecke zu suchen.

## 4 Schlussfolgerungen

Das dargelegte Verfahren ermöglicht die Analyse der Risiken sowie die Beurteilung einer ggf. notwendigen Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Tunnel, wie sie in den geltenden Vorschriften und Richtlinien für Tunnel (Tunnelrichtlinie 2004/54/EG und RABT 2006) sowie im ADR gefordert sind. Das entwickelte Verfahren ist als Hilfsmittel für die Kategorisierung zu verstehen, das einen einheitlichen Umgang mit der Thematik ermöglichen soll.

Die Gliederung des Verfahrens in mehrere Stufen erlaubt es, dass nicht für alle Tunnel die Risiken a priori mit komplexen Methoden und Modellen untersucht werden müssen und der Analysetiefgang sich an den jeweiligen tunnelspezifischen Gegebenheiten orientiert. Für die einzelnen Stufen

<sup>6</sup> Die vorgeschlagenen Kriterien zu Bewertung (Vergleichslinie) gelten nur im Zusammenhang mit den vorgeschlagenen Verfahren.

wurden die zu berücksichtigenden anwendungsspezifischen Einflussfaktoren und Randbedingungen hergeleitet und definiert. Bei der Entwicklung des Verfahrens und der Festlegung der Anforderungen an Modelle und Grundlagen wurde darauf geachtet, dass eine einheitliche Umsetzung möglich ist. Grundlage für die methodischen Elemente des entwickelten Verfahrens bildeten Erfahrungen aus bereits vorliegenden Gefahrgutrisikoanalysen sowie Sensitivitätsanalysen mit dem OECD/PIARC QRA Modell hinsichtlich der Eignung im Verfahren.

Die in der Methodik festgelegten Schwellenwerte bzw. Kriterien zur Beurteilung des Handlungsbedarfs wurden auf Grundlage der existierenden vergleichsweise geringen Datenbasis hergeleitet und festgelegt. Sie müssen deshalb nach Vorliegen hinreichender Erfahrungen mit dem beschriebenen Verfahren wieder überprüft, gegebenenfalls angepasst und weiter entwickelt werden.

## Literaturverzeichnis

- [ADR 2007]: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, 1. Januar 2007
- [ADR 2009]: 19. Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (19. ADR-Änderungsverordnung – 19. ADRÄndV) und Anlagen, BGBl 11. September 2008
- [AMUN 1997]: Amundsen, F.; Ranes, G.  
Traffic Accidents and Carfires in Norwegian Road Tunnels  
in: Safety in Road and Rail Tunnels. Third International Conference Nice, France, 9-11 March 1998. Bedford, 1998
- [ASTR 2004] Bundesamt für Straßen ASTRA  
Richtlinie  
Lüftung der Straßentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung  
Ausgabe 2004
- [BAST 1998a]: Pöppel-Decker, Martin  
Straßenverkehrsunfälle beim Transport gefährlicher Güter 1992 bis 1995, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, 1998
- [BAST 1998b]: Straßenverkehrszählung 1995. Statistik 1: Jahresfahrleistung und mittlere DTV. Auszug erhalten per Fax von der BAST (21.9.00)
- [BAST 2007]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe; FE 03.0378/2004/FRB Sicherheitsbewertung von Straßentunneln, abgeschlossen, Schlussbericht Februar 2007 (noch nicht veröffentlicht)
- [BAST 2008]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe; Leitfaden für Sicherheitsbewertungen gemäß RABT 2006, Juli 2008 (noch nicht veröffentlicht)
- [CETU 2000] Circulaire interministérielle n°2000-82  
Relative à la réglementation des la circulation des Véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels du réseau routier national  
25 August 2000
- [CETU 2003] Centre d'Etudes des Tunnels  
Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers  
Fascicule 4, Les études spécifiques des dangers (ESD)  
ENTWURF, September 2003
- [DEST 2004]: Statistische Bundesamt DESTATIS  
Schätzung der Gefahrguttransporte der Eisenbahn, der Binnen- und der Seeschifffahrt für zwei aktuelle Jahre sowie Untersuchung der Einbeziehung des Straßengüterverkehrs in das Schätzverfahren  
Mai 2004
- [DVV 1999]: Deutscher Verkehrsverlag  
Verkehr in Zahlen 1999
- [EG 2004]: Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union  
Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz  
29. April 2004
- [EGKO 2007]: Kommission der Europäischen Gemeinschaft  
Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Anwendung der Richtlinie 95/50/EG des Rates über einheitliche Verfahren für die Kontrolle von Gefahrguttransporten auf der Straße durch die Mitgliedsstaaten *KOM (2007) 795 endgültig*  
Dezember 2007
- [HBS 2001]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Ausgabe 2001
- [INER 2005a]: INERIS; Research Report N°20504 Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Moel (versions 3.60 and 3.61)  
Reference Manual, August 2005
- [INER 2005b]: INERIS; Research Report N°20504 Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Moel (versions 3.60 and 3.61)  
User Guide, Dezember 2005
- [KBA 1998]: Statistische Mitteilungen des KBA und des BAG Reihe 8, Heft 12/1998. Übersicht 10 (kum) Verkehrsleistung deutscher Lastkraftfahrzeuge von Januar bis Dezember 1998 nach Gefahrgutklassen. Gesamtverkehr – Fahrten mit Ladung (alle Verkehrsarten)
- [LS 2000] Anet, B.; Binggeli, E.(unter Mitarbeit von Ernst Basler + Partner AG)  
Luftstossphänomene infolge nuklearer und konventioneller Explosionen  
Gruppe Rüstung, AC-Laboratorium Spiez  
Januar 1998

- [MAY 2006]: Mayer, G. (2006)  
Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbststretzungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation  
Dissertation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- [OECD 2001]: Organisation for Economic Co-Operation and Development OECD, World Road Association PIARC; Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels  
Ausgabe 2001
- [PIARC 2008]: PIARC C 3.3; Analyse des Risques pour les Tunnels Routiers / Risk Analysis for Road Tunnels, 2008
- [PIARC 2009]: Vertrieb des OECE/PIARC QRAM über <http://publications.piarc.org/ressources/documents/QRAM-OrderForm-Jan07.doc>  
Stand Januar 2007
- [RABT 2006]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit  
Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln – RABT  
Ausgabe 2006
- [PRA 1999]: Unterarbeitsgruppe „Beurteilungskriterien Verkehrswege“  
Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter  
Fallbeispiel Autobahn  
August 1999
- [StBA 1998]: Statistisches Bundesamt (StBA)  
Straßenlänge nach Ortslage und Fahrleistung 1960-98 nach Kraftfahrzeugarten  
Fachserie 8, Reihe 7, 1998. Auszug erhalten per Fax von StBA (8.8.00)
- [StBA 1999]: Statistisches Bundesamt (StBA)  
Straßenverkehrsunfälle – Zeitreihen: Beteiligte Kraftfahrzeugführer von Gefahrguttransporten nach Gefahrklasse der Ladung.  
Auszug erhalten per Fax von StBA (8.8.00)
- [STEI 2002]: Steinbrecher, J; Ellinghaus, D; LKW im Straßenverkehr - Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern; Uniroyal Verkehrsuntersuchung 27; Hannover 2002
- [STFV 2000]: SR 814.012  
Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung StfV) vom 27. Februar 1991  
Stand am 28. März 2000
- [THÜR 2000]: Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur  
Risikoanalyse zum Transport gefährlicher Güter durch die Tunnelkette der BAB A71 im Bereich des Thüringer Walds  
  
Teilgutachten I: Vergleich zwischen dem Abschnitt Hochwaldtunnel und der Umfahrroute Zella-Mehlis  
2000, Ernst Basler + Partner, BUNG Ingenieure, Kündig Ingenieurbüro
- [TNO 1997] TNO: The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research  
Methods for the calculation of physical effects – Yellow book  
1997

# Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007

FE 03.0437/2007/FRB  
FE 86.0050/2008

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)  
im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr,  
Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)  
und der Länder

BUNG Ingenieure AG

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Baltzer  
Dipl.-Ing. Werner Riepe  
Dipl.-Ing. Uwe Zimmermann

Ernst Basler + Partner

Dipl.-Ing. ETH Christoph Zulauf  
Dipl.-Ing. ETH Dominique Imhof

Planung Transport Verkehr AG (PTV)

Dr.-Ing. Georg Mayer

Schlussbericht Anhang  
Oktober 2009



## Inhaltsverzeichnis

	6.4.1.3	Leitstoff Chlor	29
	6.4.1.4	Leitstoff TNT	30
	6.4.2	Ausmaßermittlung Freifeld	31
	6.4.2.1	Generelle Aspekte zur Ermittlung der Personenschäden	31
	6.4.2.2	Leitstoff Benzin	31
	6.4.2.3	Leitstoff Propan	31
	6.4.2.4	Leitstoff Chlor	32
	6.4.2.5	Leitstoff TNT	33
<b>ANHANG 1 - METHODIK</b>	<b>1</b>		
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>		
<b>2 Zielsetzung und Abgrenzung</b>	<b>1</b>		
<b>3 Methodik von Gefahrgutrisikoanalysen</b>	<b>1</b>		
3.1 Grundlagen	1		
3.2 Anforderungen an Gefahrgutrisikoanalysen	1		
3.2.1 Einleitung	1		
3.2.2 Grundsätze	1		
3.2.3 Methodische Anforderungen an die Risikoanalyse	1		
<b>4 Übersicht zum Verfahren</b>	<b>3</b>		
<b>5 Stufe 1 – Grobbeurteilung</b>	<b>3</b>		
5.1 Stufe 1a - Kenngrößenverfahren	3		
5.2 Stufe 1b - OECD/PIARC QRAM	3		
5.2.1 Modellbeschreibung	3		
5.2.2 Parameterstudie zur Überprüfung der Eignung im Verfahren	5		
5.2.3 Ermittlung der Referenzwerte für die Gefahrgutzusammensetzung	7		
5.2.4 Bewertungskriterien für die Anwendung in Stufe 1b	10		
<b>6 Stufe 2 – Vertiefende Analyse</b>	<b>12</b>		
6.1 Übersicht	12		
6.2 Leitstoffe und Szenarien	12		
6.2.1 Festlegung der Leitstoffe	12		
6.2.2 Festlegung der Szenarien	12		
6.2.2.1 Herleitung	12		
6.2.2.2 Vergleich der Szenarien der Stufen 2a (vertiefte Analyse) und 1b (OECD/PIARC Modell)	15		
6.2.3 Abschätzung der Häufigkeit von Freisetzungen	16		
6.3 Stufe 2a - Tunnel	19		
6.3.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung im Tunnel	19		
6.3.2 Ausmaßermittlung im Tunnel	22		
6.3.3 Risikoermittlung und Darstellung	25		
6.3.4 Risikobewertung und Kategorisierung	25		
6.4 Stufe 2b - Umfahrungsstrecke	28		
6.4.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung Freifeld	28		
6.4.1.1 Leitstoff Benzin	28		
6.4.1.2 Leitstoff Propan	29		
		<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>34</b>
		<b>ANHANG 2 - FALLBEISPIELE</b>	<b>1</b>
	<b>1</b>	<b>Stufe 1 – Grobbeurteilung</b>	<b>1</b>
	<b>2</b>	<b>Stufe 2 – Vertiefende Analyse</b>	<b>4</b>
	2.1	Tunnel A (Gegenverkehrstunnel)	4
	2.1.1	Einleitung	4
	2.1.2	Tunneldaten	4
	2.1.3	Häufigkeits- und Ausmaßermittlung	4
	2.1.4	Ergebnisse	5
	2.2	Tunnel B (Richtungsverkehrstunnel BAB)	6
	2.2.1	Einleitung	6
	2.2.2	Tunneldaten	6
	2.2.3	Häufigkeits- und Ausmaßermittlung	6
	2.2.4	Ergebnisse	7
	2.2.5	Gefahrgutrisiken auf der Umfahrungsstrecke	10
		<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>12</b>
		<b>ANHANG 3 - ANWENDUNGSHILFE OECD/PIARC QRA MODELL</b>	<b>1</b>



## ANHANG 1 - METHODIK

### 1 Einleitung

Der Forschungsbericht zum Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007 teilt sich in den anwenderorientierten Hauptbericht, einen wissenschaftlichen Anhang mit Erläuterungen und einen weiteren Anhang mit Fallbeispielen auf.

### 2 Zielsetzung und Abgrenzung

Der vorliegende Anhang zum Hauptbericht dient der vertieften Erläuterung, Herleitung und Beschreibung der im Bericht angewendeten Inhalte. Ziel ist die Hintergründe zum Verfahren in einem separaten Teil aufzuzeigen, um die Übersichtlichkeit des für die Anwendung bestimmten Hauptberichts zu bewahren. Für eine schnelle Übersicht ist die Struktur des Hauptberichtes im vorliegenden Anhang übernommen, so dass die Erläuterungen direkt den jeweiligen Hauptkapiteln im Bericht zugeordnet werden können.

### 3 Methodik von Gefahrgutrisikolanalysen

#### 3.1 Grundlagen

Die Grundlagen für die Methodik zur Anwendung von Gefahrgutrisikolanalysen sind im Hauptbericht enthalten.

#### 3.2 Anforderungen an Gefahrgutrisikolanalysen

##### 3.2.1 Einleitung

Ziel des Kapitels „Anforderungen an Gefahrgutrisikolanalysen“ ist die Definition der Anforderungen und Randbedingungen, die an die Methodik für eine risikobasierte Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007 gestellt werden.

Nachfolgend werden die Grundsätze (Kapitel 3.2.2) sowie die methodischen Anforderungen (Kapitel 3.2.3) an das Verfahren erläutert.

##### 3.2.2 Grundsätze

Nachfolgend sind die grundsätzlichen an das Verfahren gestellten Anforderungen festgehalten:

- Das Verfahren ermöglicht die Kategorisierung der Tunnel gemäß ADR 2007.
- Es ist nach ADR 2007 und RABT 2006 für alle deutschen Tunnel anwendbar.
- Es ermöglicht eine einheitliche Umsetzung durch die für die Umsetzung zuständigen Stellen.
- Es bildet eine transparente und nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage. Das Verfahren basiert auf definierten Parametern und Kriterien sowie auf einer systematischen Verfahrensweise, so dass die Wahl der Tunnelkategorien gemäß ADR 2007 nachvollziehbar dargelegt und begründet werden kann. Dies bedingt ebenfalls eine klare Trennung zwischen der eigentlichen Risikoanalyse und der Risikobewertung und erfordert überdies Bewertungskriterien.
- Das Verfahren ist konform mit den geltenden normativen Regelungen und rechtlichen Grundlagen.
- Der Analysetiefgang bzw. –aufwand ist adäquat dem zu untersuchenden Mengengerüst an Straßentunneln. Zu diesem Zweck basiert das Verfahren auf einem stufenweisen Vorgehen.
- Das Verfahren orientiert sich an gängigen risikobasierten Verfahren in anderen Bereichen bzw. im Ausland.
- Es basiert soweit möglich auf vorhandenen bzw. mit vertretbarem Aufwand und innerhalb nützlicher Frist zu beschaffenden oder hinreichend gut abschätzbaren Daten.

##### 3.2.3 Methodische Anforderungen an die Risikoanalyse

Nachfolgend sind die maßgeblichen methodischen Anforderungen an Gefahrgutrisikolanalysen aufgeführt. Grundsätzlich basiert das Verfahren auf einem quantitativen Ansatz zur Ermittlung der Risiken.

### Gefahrenanalyse

Die Risikobewertung deckt das Spektrum an relevanten Gefahren aus dem Transport gefährlicher Güter für Tunnel ab. Es sind dies die drei Hauptgefahren<sup>1</sup>

- Brand,
- Explosion und
- Freiwerden giftiger Gase oder flüchtiger, giftiger flüssiger Stoffe.

### Szenarien und Leitstoffe

Für die Risikoermittlung werden aus der Gefahrenanalyse die maßgeblichen Freisetzungsszenarien abgeleitet. Diese werden mittels repräsentativer Stoffe (Leitstoffen) abgebildet. Die Szenarien und die entsprechenden Leitstoffe werden soweit spezifiziert, dass sie eine Kategorisierung in eine Kategorie A bis E gemäß ADR 2007 ermöglichen.

### Risikorelevante Einflussgrößen

Die Risikobewertung berücksichtigt die maßgeblichen risikorelevanten Einflussgrößen. Es sind dies Parameter bezüglich der baulichen Ausgestaltung und der technische Ausrüstung des Tunnels<sup>2</sup>, bezüglich Verkehr und Betrieb und bezüglich der offenen Strecke (z. B. Exposition Anwohner, Straßentyp, besondere Objekte in der Umgebung). Insbesondere sind die Kriterien zur Bildung der einzelnen Untersuchungseinheiten der Umfahrungsstrecke (Aufteilung der Strecken in Abschnitte mit gleichartiger Charakteristik hinsichtlich risikorelevanter Einflussgrößen) festgelegt.

Das Verfahren basiert auf mit vertretbarem Aufwand und innerhalb nützlicher Frist zu beschaffenden oder hinreichend gut abschätzbaren Daten für die entsprechenden Tunnel. Die verwendeten statistischen Daten (beispielsweise bezüglich der Verkehrszusammensetzung) werden soweit möglich durch ortsspezifische Daten präzisiert.

### Schadenindikatoren und Systemabgrenzung

Die Risikoanalyse und –bewertung berücksichtigt Personenschäden. Die Erfahrung mit Risikoanalysen für den Transport gefährlicher Güter durch Straßentunnel zeigt, dass Sach- und Umweltschä-

<sup>1</sup> Die Gefahren aus radioaktiven und infektiösen Stoffen sind im Gegensatz zu den drei aufgeführten von primär chronischer Art. Daher werden diese Risiken in der gängigen Praxis nicht betrachtet.

<sup>2</sup> ggf. Berücksichtigung sensibler Anlagen in der Tunnelumgebung, die durch Dominoeffekte betroffen sind.

den im Vergleich zu den Personenschäden in der Regel weniger im Vordergrund stehen. Zudem zeigt die bisherige Praxis im In- und Ausland, dass bei entsprechenden quantitativen Analysen nahezu ausschließlich Personenschäden untersucht wurden.

Die Personenschäden werden anhand des Indikators Todesopfern quantifiziert.

### Risikobemessungsgröße

Die Bemessung der Risiken erfolgt anhand einer geeigneten Risikobemessungsgröße. Gemäß der heutigen Praxis werden die spezifischen Risiken aus dem Gefahrguttransport durch Straßentunnel in Form von kollektiven Risiken (Schadenerwartungswerte) bzw. Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ausgedrückt.

### Risikobewertung

Die Erfahrung im Zusammenhang mit Risikoanalysen für Straßentunnel und anderen Fachgebieten zeigt immer wieder, dass dem Aspekt der Risikobewertung eine zentrale Rolle zukommt. Neben der Analyse der Risiken ist es ebenso wichtig, klare Kriterien zu definieren, wie mit den jeweiligen Risiken umzugehen ist bzw. welche Restrisiken akzeptiert und welche Risiken nicht hinnehmbar werden. Für die Bewertung der Risiken wurden deshalb geeignete Bewertungskriterien bestimmt bzw. herangezogen. Die Bestimmung der Bewertungskriterien basiert auf einer begründeten und nachvollziehbaren Herleitung. Dabei wurden in anderen Staaten bereits festgelegte Kriterien oder Vorgaben und Erfahrungswerte aus anderen Fachbereichen als Vergleichswerte herangezogen (z. B. Schweiz, Niederlande etc.).

Die jeweiligen Bewertungskriterien sind kompatibel mit der gewählten Risikobemessungsgröße.

Die Kriterien ermöglichen eine graduelle Abstufung des Handlungsbedarfs hinsichtlich der Kategorisierung der Tunnel.

Der Unschärfbereich der Resultate ist abzuschätzen und in der Methodik zu berücksichtigen.

Weitere Kriterien, die über die zur Risikobewertung im engeren Sinn zu berücksichtigten Parameter hinausgehen, werden soweit sinnvoll bei der Risikobewertung in geeigneter Weise mit einzubezogen. Dies sind unter anderem:

- Kriterien betreffend der Umfahrungsroute: Verkehrsfluss, Lärmbelastung, Schadstoffemissionen.
- Kriterien betreffend dem Routenvergleich: Bedeutung des Verkehrsweges, grundsätzliches Vorhandensein einer Umfahrungsroute, Besonderheiten der Umfahrungsroute.
- Kriterien betreffend der praktischen Umsetzung: Umgang mit Tunnelketten, Einfluss des vom Tunnel ausgehenden Risikos innerhalb der betrachteten Tunnelroute, etc.

Des Weiteren zu berücksichtigen sind Maßnahmen betrieblicher oder baulicher Art oder betreffend der technischen Ausrüstung des Tunnels zur Minderung des Risikos.

## 4 Übersicht zum Verfahren

Eine Beschreibung des zweistufigen Verfahrens ist ausführlich im Hauptbericht enthalten. Dieses ist so aufgebaut, dass die Stufe 1 im Regelfall durch hinsichtlich Tunnelbau, Betriebstechnik und Sicherheitsthemen qualifizierten Personals in den zuständigen Verwaltungsbehörden selbst durchgeführt werden kann. Die Stufe 2 erfordert über diese Kenntnisse hinaus wegen Ihrer Komplexität und die Anwendung von vertiefenden Simulations- und Berechnungsmodellen sehr spezialisierte Kenntnisse bei der Bearbeitung..

## 5 Stufe 1 – Grob beurteilung

### 5.1 Stufe 1a - Kenngrößenverfahren

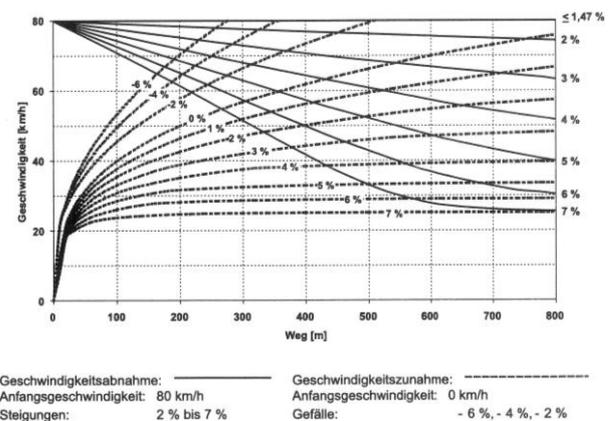
Für die Tunnelmerkmale Längsneigung und Kurvigkeit, die im Rahmen des Kenngrößenverfahrens überprüft werden müssen, werden im Folgenden die Grundlagen und Schlussfolgerungen erläutert.

#### Längsneigung $\leq 2\%$

Nach [HBS 2001] und [STEI 2002] ist die Geschwindigkeit des Schwerverkehrs in Steigungstrecken stark von der Neigung und der Länge des Streckenabschnitts abhängig.

Eine Steigung von weniger als 2 % führt nur in geringem Maße zu Geschwindigkeitseinbußen. In Steigungen oberhalb dieses Wertes können einzelne Lkw zu einem Absinken des gesamten Geschwindigkeitsniveaus führen, wenn sie aufgrund eines hohen Gewichtes und/oder schwacher Motorleistung nur noch Geschwindigkeiten deutlich unterhalb von 80 km/h erreichen können. Ausgehend von einer gefahrenen Geschwindigkeit von

80 km/h in der Ebene (Steigung  $\leq 1,47\%$ ) zeigt sich dass z. B. Steigungen von 3 % bei einer Streckenlänge von 400 m bereits zu einer Reduktion von fast  $10 \text{ km/h}^3$  führen (s. Bild 1). Es entsteht dann erheblicher Überholdruck auf der rechten Spur. Dies gilt nicht nur für Pkw-Fahrer, sondern auch für andere Lkw-Fahrer. Darüber hinaus sind die Differenzgeschwindigkeiten zwischen langsam fahrenden Lkw und schnell fahrenden Pkw trotz Geschwindigkeitsbeschränkung im Tunnel so hoch, dass ein erhöhtes Risiko für Auffahrunfälle besteht.



**Bild 1:** Geschwindigkeitsprofile für Schwerfahrzeuge in Abhängigkeit der Längsneigung - Ausschnitt 0 - 800 m [HBS 2001]

#### Kurvigkeit $\leq 250 \text{ gon/km}$

Im Rahmen einer umfangreichen Unfalluntersuchung in Straßentunneln<sup>4</sup> [BAST 2007] zeigten sich Hinweise auf einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Unfallgeschehen und dem Vorhandensein von engen Kurven im Tunnel. Dies wird durch i. d. R. vorhandene Anprallspuren an den Wänden solcher Tunnel untermauert. Neben der Häufigkeit ist auch die Unfallschwere höher als in gestreckt trassierten Tunneln, da die Zahl der Selbstunfälle (Kollision mit Tunnelwand) zunimmt.

### 5.2 Stufe 1b - OECD/PIARC QRAM

#### 5.2.1 Modellbeschreibung

Die Fragestellung, wie die Risiken von Gefahrguttransporten durch Tunnel effektiv aufgezeigt werden können, welche Gefahrgüter zum Risiko beitragen und wie ein u. U. eingeschränkter Transport dabei europaweit einheitlich gehandhabt werden

<sup>3</sup> Wert gilt für das Bemessungs-Schwerfahrzeug nach [HBS 2001].

<sup>4</sup> Untersuchung von polizeilich registrierten Unfällen in Tunneln > 400 m, die in der Baulast des Bundes sind.

Szenario Nr.	Beschreibung	Tankvolumen	Leckgröße [mm]	Volumenstromrate [kg/s]
1	LKW Brand 20 MW	-	-	-
2	LKW Brand 100 MW	-	-	-
3	Heißgasexplosion (Flüssiggasflaschen)	50 kg	-	-
4	Benzin Lachenbrand	28 t	100	20,6
5	Dampfexplosion Benzin	28 t	100	20,6
6	Chloraustritt	20 t	50	45
7	Heißgasexplosion (Flüssiggastank)	18 t	-	-
8	Dampfexplosion Flüssiggastank	18 t	50	36
9	Freistahlbrand Flüssiggastank	18 t	50	36
10	Austritt von Ammonium	20 t	50	36
11	Austritt von Ammoniak	25 t	100	24,8
12	Austritt von Acrolein aus Flaschen	100 ltr	4	0,02
13	Gasexplosion von tiefgekühltem verflüssigten CO <sub>2</sub>	20 t	-	-

Tab. 1: Übersicht der Szenarien im OECD/PIARC Modell

kann, war Anlass für eine Forschungstätigkeit auf europäischer Ebene. 1995 wurden von der OECD<sup>5</sup> und der PIARC<sup>6</sup> ein erster Forschungsauftrag zur Modellentwicklung vergeben [OECD 2001]. Auf dieser Grundlage wurde in einem weiteren Projekt 2005 die Entwicklung eines quantitativen Risikoanalysemodells abgeschlossen [INER 2005a].

Mit Hilfe dieses kommerziellen Programms ist es möglich, Streckenzüge hinsichtlich ihres Risikos, das durch die Freisetzung von Gefahrgutstoffen infolge Unfall bzw. Brand besteht, zu bewerten und Alternativrouten gegenüber zu stellen. Im Vordergrund standen dabei weiträumige Streckenabschnitte.

#### Modell / Methodik

Zur Abbildung der Wirkung verschiedener Gefahrgüter fließen sowohl deterministische als auch probabilistische Aspekte ein. In der Berechnung wird zwischen freien Streckenabschnitten und Tunneln unterschieden.

Für die freien Strecken dienen zweidimensionale Ausbreitungsmodelle, die im Wesentlichen auf

anerkannten von TNO<sup>7</sup> entwickelten Modellen basieren. Es kann für jeden Streckenabschnitt die zugehörige Gebietscharakteristik wie zeitabhängige Einwohnerdichte, Struktur, Windverteilung etc. verarbeitet werden.

Zur entsprechenden Berechnung der Wirkung in Tunnelstrecken dient ein vereinfachtes eindimensionales Ausbreitungsmodell. Es ist die Berücksichtigung der wesentlichen Tunnelgeometrien, Sicherheitsausstattungen, Lüftungssystemen (natürliche, Längs- und Halbquerlüftung) etc. möglich.

Für sämtliche Streckenabschnitte ist die Verwendung von Verkehrsdaten wie DTV, Verkehrszusammensetzung, Gefahrgutanteilen, Unfalldaten etc. möglich. Wegen der Komplexität der möglichen Dateneingaben und Änderungsmöglichkeiten im Modell sei an dieser Stelle auf den Forschungsbericht [INER 2005a] verwiesen.

Zur Berechnung der Auswirkung infolge Gefahrgutunfällen und -bränden sind die in Tab. 1 aufgeführten Standardszenarien implementiert. Zu jedem Szenario sind die zugehörigen Parameter wie z. B. Beginn und Verlauf eines Brandes sowie weitere stoffspezifische Kenndaten hinterlegt, die bei Bedarf in den entsprechenden Programmteilen angepasst werden können. Grundsätzlich sind

<sup>5</sup> Organisation for Economic Cooperation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)

<sup>6</sup> Weltstraßenverband

<sup>7</sup> Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek  
Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung

weitere Szenarien durch Eingabe aller erforderlichen Parameter und Wirkungen möglich.

### Programmstruktur

Das OECD/PIARC Modell ist im Kern ein Microsoft Excel Programm, das mit Hilfe von Tabellenblättern und VBA-Codes die einzelnen Rechenschritte ausführt. Die Dateneingabe erfolgt mit Hilfe von Eingabemasken in MS-Excel. Das Hauptprogramm (s. Bild 2) greift bei Bedarf in der Berechnung auf gesonderte Berechnungstools zurück. Dies sind zumeist ebenso Excel Dateien, für die zweidimensionale Ausbreitungsberechnung im Freien dient dagegen ein Fortran-Programm. Als Ergebnis kann sowohl das kollektive als auch das individuelle Risiko berechnet werden. Das kollektive Risiko wird in Form von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen und einem Schadenerwartungswert dargestellt.

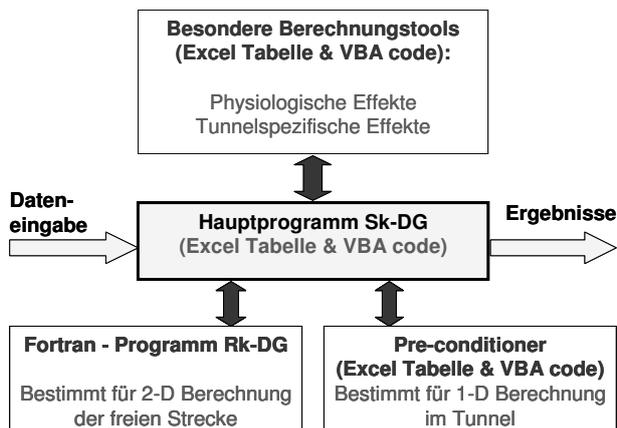


Bild 2: Funktionsschema OECD/PIARC Modell

Das Programm ist bis zur Programmversion MS-Excel 2003 entwickelt worden. In höheren Versionen ist es nicht lauffähig. Eine weitere Anpassung ist von Seiten des Entwicklers derzeit ungewiss.

### Programmverbreitung

Das OECD/PIARC Modell wird in zahlreichen europäischen Staaten für die Risikoberechnung genutzt. Insbesondere in Frankreich, Großbritannien und Österreich gehört es zum Standard.

#### 5.2.2 Parameterstudie zur Überprüfung der Eignung im Verfahren

Das OECD/PIARC QRAM ist wie oben erwähnt in zahlreichen europäischen Staaten eingeführt. Die Ausbreitungs- und Tunnelmodelle sind zum Teil jedoch recht grob, da das Modell für weiträumige Streckenvergleiche konzipiert wurde. Um die Möglichkeiten einer Nutzung zur Berechnung des intrinsischen Risikos eines Tunnels im Rahmen

des vorliegenden Verfahrens zu überprüfen, wurde eine umfangreiche Parameterstudie erstellt. Ziel war, Aussagen zur Verarbeitung von wesentlichen Sicherheitseinrichtungen und Verkehrsparametern zu erhalten.

### Untersuchungskonzept

Als Referenztunnel wurde ein Tunnel mit den folgenden Parametern modelliert:

Parameter des Modelltunnels	Wert
Verkehrsart	RV
Tunnellänge [m]	1.000
Fahrsstreifen je Richtung	2
Standstreifen	nein
Querneigung [%]	0
Zu- und Abfahrten	nein
Längsneigung [%]	0
effektive Querschnittsbreite [m]	10
DTV [Kfz/d]	50.000
SV-Anteil [%]	11
zul. Geschwindigkeit [km/h]	80
Videoüberwachung	nein
Zeitperiode Tag (normal)	6.00-22.00 Uhr
Zeitperiode Nacht (quiet)	22.00-6.00 Uhr
Busanteil am SV-Verkehr	1,5 %
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr	6 %
Verkehrsstärke pro Stunde und Richtung Tag	1.250
Verkehrsstärke pro Stunde und Richtung Nacht	625
Personenbesetzungsgrad PKW	1,3
Personenbesetzungsgrad LKW	1,1
Personenbesetzungsgrad Bus	25
Korrekturfaktor Unfallrate f. GG-Transporte	1
Geschwindigkeit PKW	80
Geschwindigkeit LKW	75
Fluchtaufforderung durch Lautsp.	ja
Einsprechen in Radio	nein
Tunnelsperrung	nein
Lüftungssystem	Längslüftung
mittl. Notausgangabstand [m]	250
Bauweise	off. Bw.

Tab. 2: Eingangsdaten Modelltunnel zur Sensitivitätsanalyse des OECD/PIARC QRAM

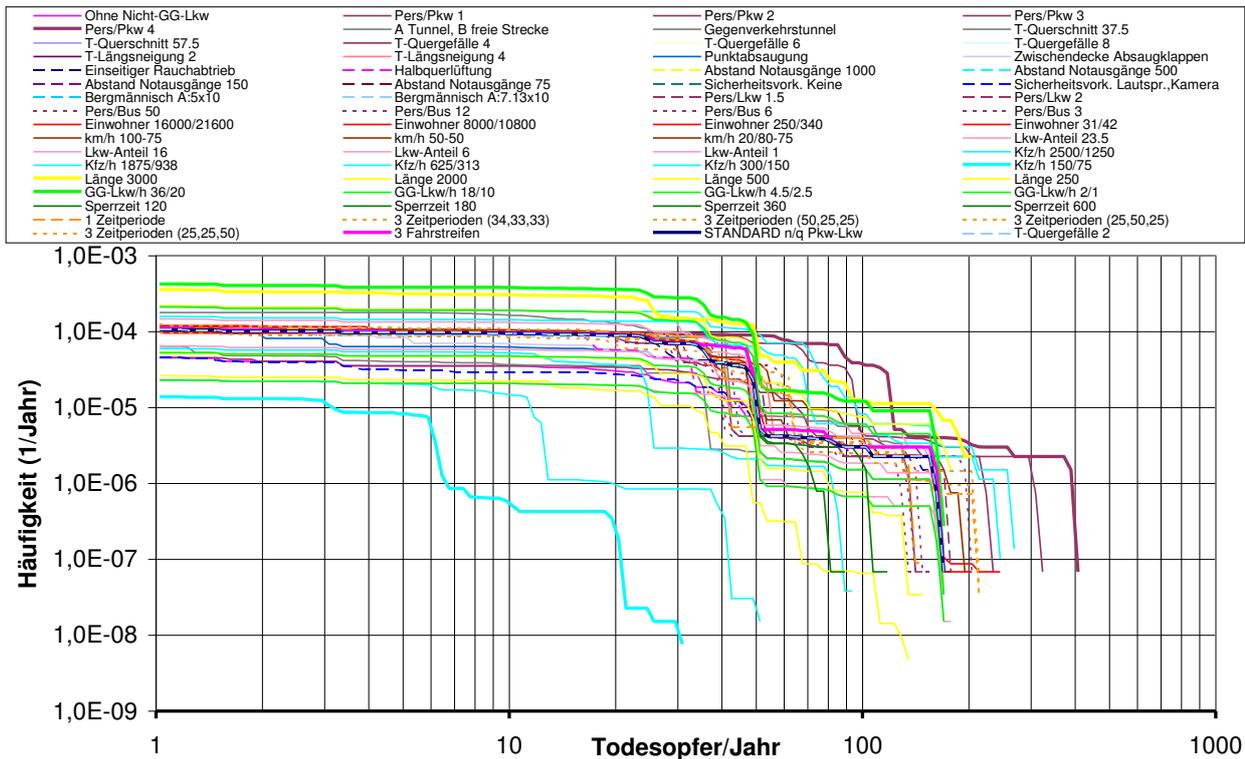


Bild 3: Ergebniszusammenstellung 68 Varianten zur Sensitivitätsprüfung des OECD/PIARC QRAM

Ausgehend von diesem Modelltunnel wurden die folgenden risikorelevanten Parameter in einer sinnvollen Bandbreite zur Sensitivitätsprüfung variiert:

- Berücksichtigung von Gefahrguttransporten
- Personenbesetzungsgrad Pkw
- Personenbesetzungsgrad Lkw
- Personenbesetzungsgrad Busse
- Gefahrgutanteil am Schwerverkehr
- Variation der berücksichtigten Zeitperioden
- Tunnellänge
- Verkehrsstärke
- SV-Anteil
- gefahrene Geschwindigkeiten
- Anzahl der Fahrstreifen pro Röhre
- Zeitintervall zwischen Ereignis und Sperrung des Tunnels
- Einwohnerdichte (am Portal)
- Verkehrsart
- lichte Querschnittsfläche im Tunnel
- Querneigung
- Längsneigung
- Tunnellüftungssystem
- Notausgangabstand

- Sicherheitseinrichtungen (Lautsprecher, Videoüberwachung)
- Bauweise

Untersucht wurden insgesamt 68 Tunnelvarianten, bei denen jeweils nur ein Parameter variiert wurde. Im Gegensatz zu dem im Verfahren vorgesehenen Bewertungskriterium des normierten Schadenerwartungswertes, wurden hier die nicht normierten Häufigkeits-Ausmaß-Diagramme herangezogen, da nur auf dieser Basis qualifizierte Aussagen zur Berechnung und Plausibilität des Modells getroffen werden konnten.

Alle Ergebnisse sind in Bild 3 zusammen dargestellt. Im Wesentlichen sind die Ergebnisse relativ zueinander plausibel hinsichtlich der Änderungen bezüglich der Häufigkeit und des Ausmaßes. Absolut gesehen sind die berechneten Werte jedoch sehr konservativ und liegen deutlich über statistischen Daten bzw. Analogieüberlegungen aus bisher durchgeführten Untersuchungen.

Einzelne Parameter werden jedoch für eine vertiefte Analyse zu wenig berücksichtigt bzw. führen zu Risikowerten, die infolge der hinterlegten Modelle zur Abbildung der einzelnen Szenarien deutlich zu konservativ sind. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Notausgangabstände, Tunnelquerschnittsgrößen, Quergefälle und Fahrstreifenanzahl zu nennen. Die verschiedenen

Lüftungsarten reagieren relativ sensibel auf veränderte Eingabedaten und sollten daher entsprechend zuverlässig eingegeben werden. Im Wesentlichen sind für die Schwächen die eindimensionale Ausbreitungsberechnung im Tunnel<sup>8</sup> und die konservativen Annahmen im Reaktions- und Fluchtmodell verantwortlich. Für die Verwendung in der Stufe 2 ist das OECD/PIARC QRAM folglich nicht geeignet. Zur Anwendung in Stufe 1b der Grobanalyse ist es jedoch gut geeignet, da es hierbei um die uneingeschränkte Freigabe von Gefahrguttransporten geht. Ist diese Entscheidung mit Hilfe des Modells nicht möglich, muss eine vertiefte Betrachtung folgen. Eine Kategorisierung lässt sich mit dem durch die PIARC vertriebenen Modell nicht zuverlässig durchführen.

#### Vor und Nachteile des Programms

Für das OECD/PIARC Modell zur Erstellung einer quantitativen Risikoanalyse sind im Folgenden Vor- und Nachteile zusammen gestellt.

##### Vorteile

- + für Grobbeurteilung ausreichend plausible Ergebnisse
- + auf dem Markt erhältliches Modell
- + relativ günstig
- + MS Office basiert
- + zweidimensionale Freifeldmodelle zur Berechnung der freien Streckenabschnitte anerkannt, eine Nutzung im Tunnel ist jedoch nicht möglich
- + Verbreitungsgrad relativ hoch
- + Anwendung in einigen Staaten der EU
- + Parameter können als „default“-Werte verwendet werden oder mit Projektspezifischen Werten hinterlegt werden → hohe Flexibilität
- + Anwendung durch Verwaltung möglich.

##### Nachteile

- Zur Nutzung für eine vertiefte Analyse nicht geeignet
- eindimensionale Modelle für Tunnel nicht ausreichend genau zur exakten Ausbreitungsberechnung
- lauffähig bis MS Excel 2003

<sup>8</sup> Die hat Einfluss auf die Interaktion von Querschnittsbreite, Lüftungssystem, Ausbreitungsart (z. B. heißer Rauch an Tunneldecke und Chlor auf Höhe der Fahrbahn)

- mit jeder neuen MS Office-Variante (ggf. auch Servicepacks) kann die Funktion beeinträchtigt sein
- Weiterentwicklung derzeit nicht geplant, sehr komplex, weltweit ca. 5 Entwickler, die nicht mit der Weiterentwicklung betraut sind
- Gefahrgutszenarien decken derzeit nur die Kategorien A, B, C ab. Kategorie D und E sind nicht differenzierbar. Dies hat zur Folge, dass in Kombination mit den vereinfachten Ausbreitungsmodellen eine Kategorisierung nach ADR nicht möglich ist<sup>9</sup>.

Darüber hinaus ist anzumerken, dass die Komplexität des Programms bei der Nutzung das notwendige fachliche Hintergrundwissen erfordert, damit Fehlanwendungen und –interpretationen des Sachverhaltes verhindert werden.

#### **5.2.3 Ermittlung der Referenzwerte für die Gefahrgutzusammensetzung**

Für die Ermittlung der Gefahrgutrisiken in Stufe 1b werden, sofern keine streckenspezifischen Angaben vorliegen, Mittel- bzw. Referenzwerte für die Verteilung des Gefahrgutaufkommens für die Anwendung des OECD/PIARC-Modells angesetzt. Die dargestellten Verteilungen (Tab. 3) entsprechen den geforderten Eingabewerten im Modell an Stoffgruppen gleicher Wirkung. Während des Programmablaufs werden diese Eingabedaten den einzelnen Szenarien 3-13 zugeordnet.

<sup>9</sup> Eine Kategorisierung wäre von der Systematik (ohne Betrachtung der Modellschwächen für eine exakte Ausbreitungsberechnung etc.) nur dann möglich, wenn die Szenarien 1 und 2 des OECD/PIARC Modells (keine Gefahrgut-Szenarien) als Stellvertreter für entsprechenden Gefahrgutszenarien verwendet werden.

Gefahrgut	Anteil
Anteil aller brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransporte) - z. B. Benzin, Diesel, etc.	0,2450
<i>davon: Anteil leicht entflammbarer brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransport) - z. B. Benzin, etc.</i>	<i>0,5000</i>
Anteil brennbarer Gase (Tanktransport) - z. B. Propan etc.	0,0280
Anteil brennbarer Gase (Flaschen) - z. B. Propan etc.	0,0090
Anteil hochgiftiger Gase, Chlortransporte in großvolumigen Tanks (20 t)	0,0002
Anteil giftiger Gase (Tanktransport) - z. B. Ammoniak, etc.	0,0110
Anteil giftiger Flüssigkeiten (Tanktransport) - z. B. Acrolein, etc.	0,0010
Anteil giftiger Flüssigkeiten (Flaschen) - z. B. Acrolein, etc.	0,0010
Anteil nicht brennbarer Druckbehälter (Flaschen) - z. B. CO <sub>2</sub> , etc.	0,0100

**Tab. 3:** Standard Gefahrgutverteilung für Deutschland bei der Eingabe in das OECD/PIARC QRAM

Die Herleitung dieser Mittel- bzw. Referenzwerte basiert auf folgenden Elementen:

- Analyse zum Gefahrgutaufkommen aus dem Jahr 2000
- Vergleich mit aktualisierten Grundlagendaten der Jahre 2001/2002
- Berücksichtigung der Gefahrgutspezifischen Eigenschaften und Umlegung auf die Transportdaten

Im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse [THÜR 2000] wurde eine Analyse aus dem spezifischen Blickwinkel einer Risikoanalyse zum Gefahrgutaufkommen in Deutschland vorgenommen. Diese basiert auf folgenden Grundlagen:

- Statistische Angaben zu Fahrten<sup>10</sup> nach Gefahrgutklassen [BAST 1998a]
- Berücksichtigung der hinsichtlich von Personenrisiken maßgeblichen Gefahrgutwirkungen:
  - Brand von Flüssigkeiten
  - Brand/Explosion von Gasen
  - Toxische Wirkung von Gasen und Flüssigkeiten
  - Explosion von Feststoffen

Die durchschnittliche Anzahl Fahrten nach Gefahrgutklassen in Deutschland wurde aus Statistiken abgeleitet. Gemäß Auswertung nach [BAST 1998a] liegt demzufolge der Anteil des Gefahrgutverkehrs am gesamten Schwerverkehr in Deutschland bei ca. 6 % [EGKO 2005], [EGKO 2007]. Aus Blickwinkel der Risiken stehen für die eingangs genannte Gefahrgutwirkungen insbesondere die Gefahrgutklassen 1, 2 und 3 im Vordergrund: Die Gefahrgutklasse 1 umfasst etwa 1 % des gesamten Gefahrguttransportes, die Klasse 2 rund 15 %. Die Klasse 3 ist mit einem Anteil von 68 % die anteilmäßig größte Gefahrgutklasse ([BAST 1998a]<sup>11</sup>). Ein Vergleich mit aktualisierten Werten aus den Jahren 2001/2002 [DEST 2004]<sup>12</sup> zeigt, dass es im betrachteten Zeitraum zwar gewisse Veränderungen im Transportaufkommen gegeben hat, dass diese aber im Sinne der vorliegenden Fragestellung nicht maßgeblich sind. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die verwendeten Werte die heutige Situation für die Bedürfnisse der Grobbeurteilung ausreichend genau abbilden.

Für die Zwecke des Einbezugs der Gefahrguttransportdaten im Zuge einer Risikoanalyse sind nicht allein die Angaben zu den Transportdaten relevant, sondern auch das jeweilige Gefährdungspotenzial eines Gefahrgutes bzw. einer Gefahrgutgruppe. Dementsprechend sind nicht alle Gefahrgüter bzw. Gefahrguttransporte aus Blickwinkel der

<sup>10</sup> Für die Zwecke des vorliegenden Verfahrens ist die Zahl der Transporte bzw. Fahrten die maßgebende statistische Größe, da die Zahl der Unfälle bzw. der Unfälle mit Freisetzungen und damit die für die Risikoanalyse relevante Ereignishäufigkeit von dieser Größe abhängig ist. I. d. R. liegen die statistischen Informationen zu Gefahrguttransporten meist in Form von Transportleistungen [t-km] vor. Auf dieser Basis lassen sich aber erfahrungsgemäß keine zweckmäßigen Informationen zur Zahl der Fahrten bestimmen.

<sup>11</sup> Die prozentualen Anteile der Klassen am Gefahrguttransport beziehen sich im vorliegenden Kontext auf die Anzahl der Transporte und nicht auf die transportierten Mengen.

<sup>12</sup> Unter anderem Grundlage für [EGKO 2005]

(Personen-)Risiken relevant. Dies kann u. a. auf folgende Charakteristika der entsprechenden Gefahrgüter zurückzuführen sein:

- Die (Stoff-)Eigenschaften der Gefahrgüter sind für Personen unkritisch (z. B. geringe Toxizität, keine maßgebliche Brand- oder Explosionsgefahr etc.)
- Die Gefahrgüter sind aufgrund ihres Ausbreitungsverhaltens für Personen unkritisch: So sind beispielsweise toxische, nicht luftgängige Stoffe, die in fester Form vorliegen (z. B. Pulver o. ä.) bei einer Freisetzung aus Blickwinkel der Risiken nicht relevant.
- Gefahrgüter, die nur in sehr geringen Mengen transportiert werden und die in diesen Mengen keine maßgebliche Gefahr für Personen darstellen, sind für die Risikobetrachtung ebenfalls nicht von Relevanz.

Aus dem Blickwinkel der (Personen-)Risiken sind somit bevorzugt Stoffe mit einem vergleichsweise hohen Transportaufkommen relevant, wenn von ihnen aufgrund ihrer spezifischen (Stoff-)Eigenschaften eine signifikante Gefährdung ausgeht.<sup>13</sup> Diese Stoffe bzw. deren primäre Wirkung

- Explosions-/Druckwirkung
- Toxizität
- Brandwirkung

werden mittels der Leitstoffe abgebildet. Die Leitstoffe stehen dabei als Stellvertreter für die Gesamtheit aller Gefahrgüter, mit gleichartiger Hauptwirkung. Nachfolgend ist die Herleitung für die bezeichneten maßgeblichen Gefahrgutwirkungen dargelegt.

#### Brand von Flüssigkeiten

Maßgebend zur Berücksichtigung der primären Gefahrgutwirkung "Brand von Flüssigkeiten" sind in erster Linie Mineralölprodukte. Diese lassen sich durch den (Leit-)Stoff Benzin abbilden (vgl. auch Kapitel 6.2), dessen Anteil an der Gefahrgutklasse 3 rund 30 % beträgt. Zur Berücksichtigung weiterer Stoffe/Gefahrgüter mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. ähnlichen Auswirkung im Falle einer Freisetzung (z. B. Heizöl, Diesel, Flugpetrol, Kerosin etc.) wird dieser Anteil entsprechend dem Risikopotenzial dieser Stoffe/Gefahrgüter erhöht. Für den Leitstoff Benzin

<sup>13</sup> Daraus wird auch ersichtlich, dass in Tab. 3 nicht 100% des Gefahrgutaufkommens für die Frage der Ermittlung der maßgeblichen Risiken zu berücksichtigen sind.

beträgt dieser Faktor gemäß [THÜR 2000] 1,2<sup>14</sup>. Somit berechnet sich der (theoretische) Anteil der entzündlichen Flüssigkeiten am Gefahrguttransport zu insgesamt 36 %.

Wird dieser Anteil der stoff- und transporttypspezifischen Fahrten an der Gefahrgutklasse 3 mit dem spezifischen Anteil am gesamten Gefahrguttransport (68 %) verrechnet, so resultiert ein Wert von 24,5 %. Dieser Wert stellt den Anteil aller brennbaren Flüssigkeiten dar.

#### Brand/Explosion von Gasen

Der Anteil von Flüssiggasen an der Gefahrgutklasse 2 beträgt gemäß [BAST 1998a] 25 %. Der Anteil des meisttransportierten (Leit-)Stoffes Propan beträgt dabei rund 20 %. Die restlichen 4 % entfallen auf Butan und weitere Vertreter, welche aufgrund ihrer ähnlichen Eigenschaften ebenfalls berücksichtigt werden. Dementsprechend wird (analog zum (Leit-)Stoff Benzin) für die Risikoanalyse ein wirkungsspezifischer Korrekturfaktor von 1,25 angesetzt, womit sich ein repräsentativer Anteil an Flüssiggasen von 25 % an der Gefahrgutklasse 2 ergibt. Es wird ferner angenommen, dass ein Viertel des gesamten Flüssiggastransportes in Kleingebinden und drei Viertel in Tanks erfolgt.<sup>15</sup> Zusätzlich sind analog zum Vorgehen für den Leitstoff Benzin die Werte der stoff- und transporttypspezifischen Fahrten an der Gefahrgutklasse 2 mit dem spezifischen Anteil am gesamten Gefahrguttransport (15 %) zu verrechnen. Damit ergibt sich für den Anteil an brennbaren Gasen in Tanks der Wert von 2,8 % (Anteil von Flüssiggasen an der Gefahrgutklasse 2 von 25 % x Anteil Transporte in Tanks von  $\frac{3}{4}$  x Anteil der Gefahrgutklasse 2 am gesamten Gefahrguttransport von 15 %). Analog ergibt sich für den Anteil an brennbaren Gasen in Flaschen der Wert von 0,9 % (Anteil von Flüssiggasen an der Gefahrgutklasse 2 von 25 % x Anteil Transporte in Tanks von  $\frac{1}{4}$  x Anteil der Gefahrgutklasse 2 am gesamten Gefahrguttransport von 15 %).

<sup>14</sup> Heizöl bzw. Diesel als wichtigste weitere Stoffe, die zur Abbildung der Gefahrgutwirkung Brand zu berücksichtigen sind (Anteil an der Gefahrgutklasse 3 von ca. 66 %), haben einen höheren Flammpunkt als Benzin. Da die Wahrscheinlichkeit einer Zündung im Ereignisfall deutlich kleiner ist, werden diese Stoffe mit entsprechend reduziertem Gewicht berücksichtigt.

<sup>15</sup> Verteilung gemäß den im OECD/PIARC Modell vorgeschlagenen Standardwerten.

### Toxische Wirkung von Gasen und Flüssigkeiten

Der Anteil der Stoffe mit toxischer Wirkung an der Gefahrgutklasse 2 beträgt rund 9 %. Dabei berücksichtigt ist Chlor mit einem Anteil von 4 % sowie weitere Stoffe mit toxischer Wirkung mittels eines wirkungsspezifischen Korrekturfaktors von 2,3. Mit dem spezifischen Anteil der Gefahrgutklasse 2 von 15 % am gesamten Gefahrguttransport errechnet sich ein Anteil an Stoffen mit toxischer Wirkung am gesamten Gefahrguttransport von 1,4 %. Diese Transporte werden gemäß der im OECD/PIARC-Modell vorgeschlagenen Standardverteilung auf die entsprechenden Szenarien (Szenarien 10, 11 und 12) verteilt.<sup>16</sup> Chlor-Tanktransporte entsprechend dem Szenario 6 (20 t) kommen in Deutschland so gut wie nicht vor, da sie nach der Gefahrgutverordnung sehr hohen Auflagen bezüglich Anmeldung, Streckenbindung und Bevorzugung von Bahntransporten genügen müssen [GGVSE 2006]. Da das OECD/PIARC Modell jedoch kein Szenario für Chlortransporte für in Deutschland übliche Rollcontainer von 1 t vorsieht, wird das Szenario 6 mit einem entsprechend geringen Anteil angesetzt.

### Explosion von Feststoffen

Im OECD/PIARC-Modell werden Explosionswirkungen über explosionsartige Kohlendioxidfreisetzungen dargestellt. Dies ist jedoch nicht inhaltlich begründet sondern basiert auf den im OECD/PIARC-Modell implementierten Wirkungsmodellen, welche Feststoffexplosionen nicht abbilden können. Für die vorliegende Betrachtung wird aber zur Ermittlung der maßgeblichen Transportdaten für diese Gefahrgutwirkung (Szenario 13) auf Daten für die Gefahrgutklasse 1 abgestützt. Deren Anteil am Gefahrguttransport beträgt 1 %. Dieser Wert wird direkt im OECD/PIARC-Modell für Szenario 13 angesetzt.

### Resultierende Referenzwerte für die Gefahrgutzusammensetzung

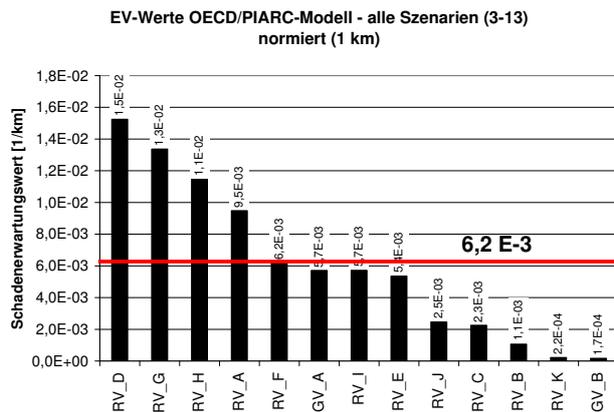
Die resultierenden Referenzwerte für die Gefahrgutzusammensetzung sind in Tab. 3 dargestellt.

Die resultierenden rund 31 % für die Gesamtheit aller Szenarien entspricht aufgrund der oben genannten Erläuterungen nicht realen Transportdaten (Anzahl Fahrten) sondern stellt eine theoretische Größe dar und berücksichtigt implizit auch das aus Blickwinkel einer Risikoanalyse maßgebliche Gefahrenpotenzial der Gefahrgüter/Stoffe.

<sup>16</sup> In diesen Szenarienanteile sind Chlortransporte in kleinen Transportmengen bzw. kleinen Behältnissen eingerechnet.

### 5.2.4 Bewertungskriterien für die Anwendung in Stufe 1b

Zur Festlegung eines geeigneten Bewertungskriteriums wurden die Schadenerwartungswerte (EV-Werte<sup>17</sup>) der 13 Beispieltunnel (s. Fallbeispiele, Anhang 2, Kapitel 1) herangezogen. In den folgenden Abbildungen (Bild 4 bis Bild 8) sind die normierten Werte zusammengestellt. Der jeweilige Grenzwert ist ebenso in den Diagrammen enthalten.



**Bild 4:** Kalibrierung EV-Grenzwert - Gesamt

Der normierte Grenzwert für alle Gefahrgutszenarien wurde zu  $6,2 \cdot 10^{-3} \text{ Todesopfer}_{a\text{-km}}$  festgelegt. Die vier Tunnel RV\_D, RV\_G, RV\_H und RV\_A zeichnen sich durch eine Kombination von hoher Verkehrsbelastung, großer Tunnellänge, hoher Längsneigung bzw. hohem Unfallrisiko durch Zu- und Abfahrten aus. Diese Parameter fallen bei den einzelnen Tunneln unterschiedlich stark ins Gewicht. Davon deutlich abgesetzt liegen weiter vier Tunnel auf einem vergleichbaren Niveau, die jedoch alle im Rahmen einer vertieften Studie als unkritisch betrachtet werden. Der Grenzwert wurde folglich unmittelbar oberhalb bestimmt. Der Grenzwert für alle Szenarien liegt unterhalb der Summe aller Einzelgrenzwerte, so dass ein Tunnel, der bei allen vier Einzelwerten knapp unterhalb der Grenzen liegt, in einer vertieften Analyse betrachtet werden muss.

<sup>17</sup> Erläuterungen zum Schadenerwartungswert sind im Kapitel 3.1.2 des Berichts enthalten.

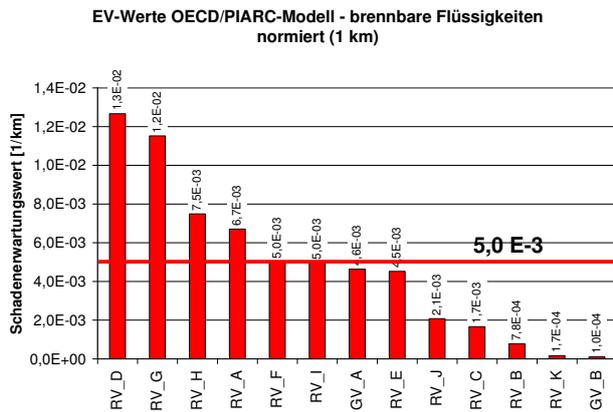


Bild 5: Kalibrierung EV-Grenzwert - Brand

Die Schadenerwartungswerte für das Gefahrgutrisiko Brand zeigen ein ähnliches Bild wie der Gesamtwert. Dies ist mit der Häufigkeit der Brandszenarien infolge des hohen Anteils der Gefahrgutklasse 3 zu erklären. Die Wahl des Grenzwertes von  $5,0 \cdot 10^{-3}$  Todesopfer/a·km erfolgte analog zum Gesamtwert.

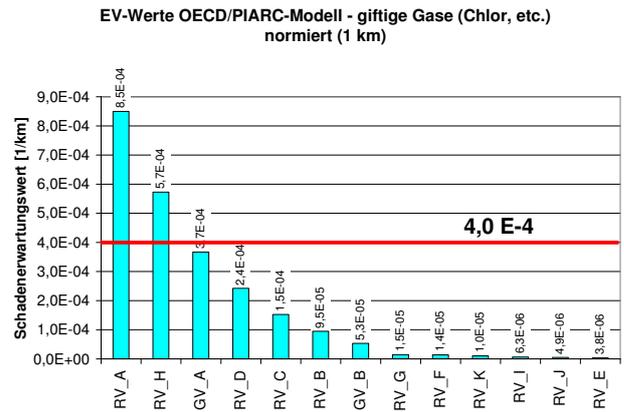


Bild 7: Kalibrierung EV-Grenzwert - giftige Gase

Der Schadenerwartungs-Grenzwert für den Transport giftiger Gase wird durch die Tunnel RV\_A und RV\_H deutlich dominiert. Dies ist mit einer sehr hohen Zahl exponierter Personen im Ereignisfall zu erklären. Beim Tunnel RV\_H ist dafür die Länge von fast 8 km verantwortlich, deren Häufigkeitsanteil normiert wird, das Ausmaß jedoch in vollem Umfang wirksam wird. Beim Tunnel RV\_A führen der breite Querschnitt (3 Richtungsfahrbahnen) und die hohe Unfallhäufigkeit infolge Zu- und Abfahrten zu den hohen Schadenerwartungswerten. Der Grenzwert wurde mit  $4,0 \cdot 10^{-4}$  Todesopfer/a·km festgelegt.

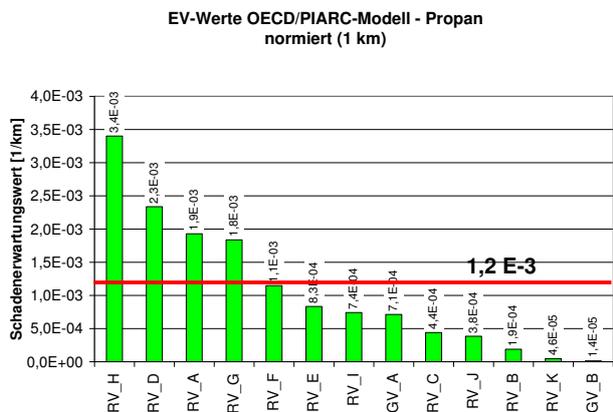


Bild 6: Kalibrierung EV-Grenzwert - Druck/Brand

Die Einzelwerte der Fallbeispiele für den Schadenerwartungswert Druck/Brand werden ebenfalls wegen des vergleichbar hohen Aufkommens der entsprechenden Transporte durch die gleichen vier Tunnel dominiert. Der Grenzwert wurde analog zum Gesamtwert auf  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Todesopfer/a·km bestimmt. Der Wert liegt unterhalb des Schadenerwartungswertes für Brand, da das Szenario vergleichsweise seltener auftritt, das Schadenausmaß jedoch deutlich größer ist.

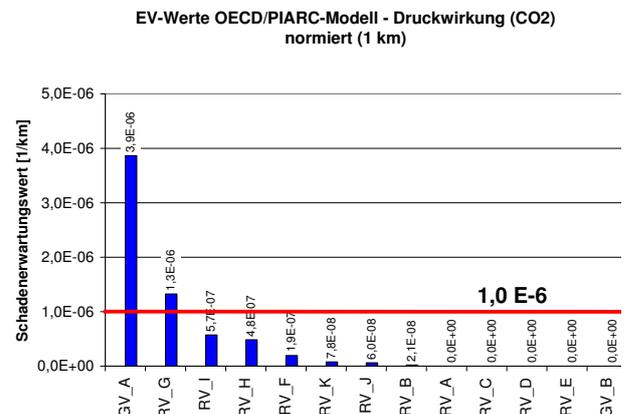


Bild 8: Kalibrierung EV-Grenzwert - reine Druckwirkung

Die reine Druckwirkung (im OECD/PIARC-Modell durch den „kalten BLEVE“ von CO<sub>2</sub> abgebildet) wirkt sich besonders stark beim Tunnel GV\_A aus. Der Grund liegt in der extrem hohen Schwerverkehrsbelastung, die eine entsprechende Häufigkeit zur Folge hat. Da dieses Szenario selten vorkommt aber zu hohen Opferzahlen führt, wurde der Grenzwert mit  $1,0 \cdot 10^{-6}$  Todesopfer/a·km festgelegt.

Zur Überprüfung der Eignung der gewählten Werte, wurde sicher gestellt, dass unter Anwendung einer

vertieften Analyse gem. Stufe 2a kein als sicher eingestufte Tunnel kategorisiert werden müsste. Für 10 von den 13 mit dem OECD/PIARC Modell untersuchten Tunnel konnte das intrinsische Risiko der Tunnel auf Basis von vertieften Analysen dargestellt werden. Diese Analysen wurden für Gutachten aus den Jahren 2000 bis 2008 durchgeführt.

## 6 Stufe 2 – Vertiefende Analyse

### 6.1 Übersicht

Eine Übersichtsgrafik ist im Hauptbericht enthalten.

### 6.2 Leitstoffe und Szenarien

#### 6.2.1 Festlegung der Leitstoffe

Das Spektrum der transportierten Gefahrgüter und der verschiedenen Wirkarten sowie der transportierten Mengen und Transportgebilde ist ausgesprochen breit und kann im Rahmen einer Risikoanalyse nicht vollständig abgedeckt werden. Aus diesem Grund werden mittels repräsentativer Stoffe - so genannter Leitstoffe - die maßgebenden Gefahrgutwirkungen abgebildet. Diese Stoffe stehen dabei stellvertretend für alle Stoffe, deren maßgebliche Gefahrgutwirkung vergleichbar ist. Die Hauptgefahrenwirkungen, welche gemäß der in ADR vorgegebenen Kategorisierung aus Blickwinkel der (Personen-)Risiken berücksichtigt werden müssen, sind:

- Explosions-/Druckwirkung
- Toxizität
- Brandwirkung

Aufgrund dieser Gefahrgutwirkungen sind bei einer etwaigen Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Tunnel die jeweiligen Abstufungen in den Tunnelkategorien nach ADR vorzusehen. Um die maßgeblichen Gefahrenwirkungen abzubilden werden die vier Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und Trinitrotoluol (TNT) herangezogen. Sie decken die Gefahrgutklassen 1, 2 und 3 ab. Auf diese drei Klassen entfallen rund 90 % aller transportierten Gefahrgüter in Deutschland. Aus Blickwinkel der Risiken ist das Gefahrenpotential dieser Stoffe für Personen im Vergleich zu den anderen Gefahrgutklassen überdurchschnittlich hoch. Deshalb ist es zulässig, sich in der Risikoanalyse im Bereich Personenschäden auf diese Gefahrgutklassen zu beschränken, wie dies auch in anderen Untersuchungen in vergleichbarer Weise der Fall ist (vgl. beispielsweise [THÜR 2000]).

Die Ermittlung und Bewertung der Risiken wird ausschließlich auf diese Leitstoffe abgestützt. Für die Modellierung der Gefahrgutausbreitung und -wirkungen und die Ermittlung der Schadenausmaße werden die charakteristischen Eigenschaften des jeweiligen Stoffes herangezogen.<sup>18</sup>

Die gewählten Leitstoffe weichen von den Leitstoffen des für die Stufe 1b des Verfahrens verwendeten OECD/PIARC Modells teilweise ab. Zum einen werden vereinfachend die im OECD/PIARC Modell verwendeten Stoffe zur Abbildung der toxischen Wirkung (Acrolein, Ammoniak, Chlor) unter dem Leitstoff Chlor zusammengefasst. Zum anderen werden Druckwirkungen infolge Explosion anstelle von CO<sub>2</sub>, welches sich nur bedingt zur Abbildung von maßgeblichen Explosionswirkungen eignet, mit dem Sprengstoff TNT abgebildet. Weitere Änderungen gegenüber dem OECD/PIARC Modell betreffen die Szenariengrößen (vgl. nachfolgendes Kapitel).

#### 6.2.2 Festlegung der Szenarien

##### 6.2.2.1 Herleitung

Die Definition der Szenarien erfolgt im Hinblick auf die Abbildung der Tunnelkategorien gemäß ADR. Für jeden Stoff definiert ADR in Abhängigkeit der transportierten Menge einen Tunnelbeschränkungscode. Für die vier Leitstoffe ist diese Spezifikation in Tab. 4 dargestellt<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> So wird beispielsweise für die Ermittlung der Hitze- und Rauchgasentwicklung auf das Gefahrgut Benzin abgestützt. Die dem Leitstoff Benzin zugeordneten Gefahrgüter wie Heizöl, Dieselöl, Flugpetrol usw. haben zwar alle die gleiche maßgebende Gefahrgutwirkung, sie haben aber teilweise unterschiedliche Charakteristika (Dampfdruck, Zündtemperatur etc.), die aus Aufwandgründen nicht allesamt in einer Risikoanalyse abgebildet werden können. Eine Beschränkung – in diesem Fall auf das Gefahrgut Benzin – ist aus Aufwandgründen deshalb unumgänglich.

<sup>19</sup> Die Tunnelbeschränkungscode sowie die Beförderungskategorie beziehen sich dabei auf den jeweiligen Stoff bzw. das jeweilige Gefahrgut, der/das als Repräsentant/Leitstoff verwendet wird.

Leitstoff	Tunnelbeschränkungscodes gemäß ADR 2009	Beförderungskategorie gemäß ADR 2009
Benzin	D/E	2 (333 lt)
Propan	B/D	2 (333 kg)
Chlor	C/D	1 (50 kg)
TNT	B1000C	1 (20 kg)

Tab. 4: Spezifikation der Leitstoffe gemäß ADR 2009

Basierend auf der Spezifikation der Leitstoffe wurden die Szenarienarten und -größen so gewählt, dass die Tunnelkategorien gemäß ADR 2009 sinnvoll abgebildet werden (vgl. Tab. 4).

Es sei aber an diese Stelle nochmals betont, dass die Leitstoffe eine Stellvertretungsfunktion übernehmen und als Repräsentant für die jeweilige maßgebende Gefahrgutwirkung stehen. So steht beispielsweise der Leitstoff Chlor stellvertretend für alle toxischen Gase und toxischen, leicht flüchtigen Flüssigkeiten.<sup>20</sup> Dementsprechend stehen die jeweiligen Szenarien nicht für die einzelnen Stoffe/Gefahrgüter im Sinne einzelner UN-Nummern nach ADR, sondern für die jeweiligen Wirkungen, die mit der Tunnelkategorisierung im Bedarfsfall beschränkt werden sollen. Beispiel: Die Szenarien 2 und 6 repräsentieren die maßgeblichen Wirkungen von (verhältnismäßig) kleineren Bränden und toxischen Wirkungen, da die entsprechenden Stoffe/Gefahrgüter, welche für den Tunnelbeschränkungscodes D bzw. E durch einen Tunnel geführt bzw. nicht geführt werden dürfen, vorwiegend diese Wirkungen aufweisen.<sup>21</sup>

<sup>20</sup> Für die Modellierung der Gefahrgutwirkung werden jeweils die charakteristischen Eigenschaften des Stoffes/Gefahrgutes verwendet.

<sup>21</sup> Neben diesen Hauptwirkungen sind auch andere Wirkungen möglich (z. B. Druckwirkungen). Diese Wirkungen stellen aber nicht die Hauptwirkungen dar.

Leitstoff	Szen.-Nr.	Freisetzungsort	Freigesetzte Menge	Berücksichtigte Ausbreitungs- und Wirkungsarten	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR	Tunnelkategorie nach ADR
Benzin	1	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 20 m <sup>3</sup> .	15 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Lachenbrand</li> <li>▪ Lachenbildung und verzögerte Zündung</li> <li>▪ Rauchgasausbreitung</li> </ul>	große Brandgefahr	D
	2	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 10 m <sup>3</sup> .	8 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Lachenbrand</li> <li>▪ Lachenbildung und verzögerte Zündung</li> <li>▪ Rauchgasausbreitung</li> </ul>	-	E
Propan	3	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s bzw. 30 kg/s	12 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE</li> <li>▪ Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand</li> </ul>	sehr große Explosionsgefahr	B
	4	Transport in Kleingebinden, spontane oder kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s bzw. 30 kg/s.	1 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE</li> <li>▪ Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand</li> </ul>	große Brandgefahr	D
Chlor	5	Tanktransport; spontane Freisetzung von 4 t	4 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen</li> </ul>	Freisetzung giftiger Stoffe	C
	6	Transport in Kleingebinden (Gesamtmenge < 50kg); spontane Freisetzung	50 kg*	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen</li> </ul>	-	E
TNT	7	Transport von 1.000 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	1 t	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)</li> </ul>	sehr große Explosionsgefahr	B
	8	Transport von 100 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	100 kg	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)</li> </ul>	große Explosionsgefahr	C

\* Vereinfachend wird von einer Freisetzungsmenge von 50 kg des Leitstoffes ausgegangen.

**Tab. 5:** Überblick der untersuchten Szenarien zur Abbildung der Kategorien gemäß ADR

#### Abbildung der Hauptgefahr "sehr große Explosion" (Stoffe mit Tunnelbeschränkungscode B)

Die Gefahr von sehr großen Explosionen wird durch die Risiken aus dem Transport von großen Mengen an TNT (Maßgebende Gefahrgutwirkung: Detonation, Szenario 7 gemäß Tab. 5) und von

Propan in Tanks (Szenario 3)<sup>22</sup> abgebildet. Bei einem Propanereignis werden die Wirkungsarten

<sup>22</sup> Dem Propanszenario zur Abbildung der Wirkungsart "sehr große Explosion" wurde die in Deutschland am häufigsten vorkommende Transportmenge von 12 Tonnen zugrunde gelegt, welche deutlich unter dem im OECD/PIARC Modell verwendeten Wert liegt. Transporte von bis zu 21 Tonnen finden lediglich für die Beförde-

BLEVE, Gaswolkenbrand/-explosion und Freistrahbrand berücksichtigt.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) bezeichnet die spontane Freisetzung eines verflüssigten, brennbaren Gases aus einem Druckbehälter unter Bildung eines (im Freien aufsteigenden) Feuerballs.

Der Gaswolkenbrand beschreibt die Entzündung und den Abbrand einer brennbaren Gemischwolke. Der Abbrand geschieht im Freifeld in der Regel nicht explosionsartig, erzeugt also primär Wärme und i. A. keine maßgeblichen Druckwirkungen. In Fällen mit Verdämmung (Tunnel) können Turbulenzen zu Flammengeschwindigkeiten führen, welche Druckwirkungen erzeugen können (Gaswolkenexplosion).

Bei einem Leck geringen Durchmessers in einem Druckbehälter mit verflüssigten Gasen tritt der Stoff gasförmig mit sehr hohen Geschwindigkeiten aus. Im Falle einer Entzündung entsteht ein Feuerstrahl, der Reichweiten von einigen zehn Metern erreichen kann (so genannter Freistrahbrand)<sup>23</sup>.

#### Abbildung der Hauptgefahren "Freisetzung giftiger Stoffe" und "große Explosion" (Stoffe mit Tunnelbeschränkungscode C)

Die Wirkungen bei einem Ereignis mit Stoffen mit Tunnelbeschränkungscode C werden durch die Szenarien 5 (Schwergasausbreitung mit humantoxischer Wirkung)<sup>24</sup> und 8 (Detonation beim Transport von mittleren Mengen an TNT) abgebildet.

#### Abbildung der Hauptgefahr "großer Brand" (Stoffe mit Tunnelbeschränkungscode D)

Die Gefahr "großer Brand" wird einerseits durch die Risiken beim Tanktransport von Mineralöl (Leitstoff

---

ung ab Raffinieren statt und sind deshalb deutlich seltener und für die vorliegende Betrachtung nicht relevant.

<sup>23</sup> Theoretisch kann sich vor einer Zündung bei einem Austritt von Flüssigphase oder eines Flüssigkeits-/Gasgemisches auch eine (kleinflächige) Lache am Freisetzungsort bilden. Die Flüssigphase wird jedoch rasch verdampfen.

<sup>24</sup> Bei den Chlortransporten wurde von den in Deutschland üblichen Transportmengen ausgegangen. Transporte von 20 Tonnen Chlor, wie sie im OECD/PIARC Modell berücksichtigt werden, finden in Deutschland so gut wie nicht statt. Die üblichen Transporte werden im Rahmen der Stufe 2 durch geeignete Szenarien berücksichtigt.

Benzin, Szenario 1)<sup>25</sup> und andererseits durch die Risiken beim Transport von Flüssiggas in Kleingebinden (Szenario 4) abgebildet. Beim Brandereignis des Szenarios 1 werden die Schadenwirkungen infolge Wärmestrahlung sowie Rauchgasen berücksichtigt. Für den Transport von Flüssiggas in Kleingebinden werden wie beim Tanktransport (Szenario 3) ebenfalls die möglichen Wirkungsarten BLEVE, Gaswolkenbrand/-explosion und Freistrahbrand berücksichtigt.

#### Abbildung der übrigen Gefahren (Stoffe mit Tunnelbeschränkungscode E)

In Tunneln der Kategorie D sind nur Gefahrgüter zugelassen, bei denen sich im Falle einer Freisetzung keine der für die übrigen Kategorien definierten großen Gefahren (sehr große bzw. große Explosion, Freisetzung giftiger Stoffe, großer Brand) ergibt. Eine Analyse der in einem Tunnel der Kategorie D zugelassenen Stoffe (d. h. Stoffe mit Tunnelbeschränkungscode E) ergibt, dass die verbleibenden Risiken hauptsächlich von zwei Gefahrenarten bestimmt werden: einerseits von den Gefahren aus dem Transport von Mineralölen in Kleingebinden (Brand), andererseits von den Gefahren aus dem Transport von toxischen bzw. ätzenden Stoffen in Kleingebinden. Diese Risiken werden durch die Szenarien 2 (Mineralölbrand) und 6 (Schwergasausbreitung mit humantoxischer Wirkung) abgebildet, wobei die hinterlegten Transportmengen die in Tunneln der Kategorie D zugelassenen Höchstmengen berücksichtigen (Ereignisse mit mittleren bzw. kleinen Ausmaßen).

#### 6.2.2.2 Vergleich der Szenarien der Stufen 2a (vertiefte Analyse) und 1b (OECD/PIARC Modell)

Im Hinblick auf den Vergleich der Szenarien der beiden Stufen sind folgende Punkte bezüglich der grundlegenden Philosophie des OECD/PIARC Modells festzuhalten:

---

<sup>25</sup> Zur Abbildung von großen Brandwirkungen wird eine kleinere Transportmenge angenommen als im OECD/PIARC Modell (15 Tonnen gegenüber 28 Tonnen). Gegenüber der konservativen Betrachtung des OECD/PIARC Modells wird in Stufe 2a im Sinne einer Mittelwertbetrachtung nicht von einer Vollbeladung aller Fahrzeuge ausgegangen, sondern es werden auch die nur teilweise beladenen Transporte berücksichtigt, womit eine durchschnittliche Beladung von 15 Tonnen resultiert.

- Das OECD/PIARC Modell deckt zwar grundsätzlich die Hauptwirkungen aus Gefahrguter-eignissen ab, wurde aber nicht explizit im Hinblick auf eine Kategorisierung gemäß ADR ausgelegt. Beispielsweise erlauben die Szenarien des OECD/PIARC Modells keine Unterscheidung der Tunnelkategorien D und E.
- Das OECD/PIARC Modell wurde zum Zweck des rein relativen Routenvergleichs entwickelt. Dazu wurde sowohl bei Modellannahmen wie auch bei der Wahl der Szenariengrößen jeweils vom ungünstigsten Fall ausgegangen. Dies bedeutet, dass das Modell bei einer absoluten Betrachtung der resultierenden Risiken sehr konservative Ergebnisse liefert.

Die wichtigsten Unterschiede in den Szenarien der beiden Stufen werden nachfolgend kurz erläutert.

Zur Abbildung von großen Brandwirkungen wird in der Methodik der Stufe 2a eine kleinere Transportmenge angenommen als im OECD/PIARC Modell (15 Tonnen gegenüber 28 Tonnen). Gegenüber der "worst case"-Betrachtung des OECD/PIARC Modells (vgl. vorhergehende Bemerkung) wird in Stufe 2a im Sinne einer Mittelwertbetrachtung nicht von einer Vollbeladung aller Fahrzeuge ausgegangen, sondern es werden auch die nur teilweise beladenen Transporte berücksichtigt, womit eine durchschnittliche Beladung von 15 Tonnen resultiert.

Dem Propanszenario zur Abbildung der Wirkungsart "sehr große Explosion" wurde die in Deutschland am häufigsten vorkommende Transportmenge von 12 Tonnen zugrunde gelegt, welche deutlich unter dem im OECD/PIARC Modell verwendeten Wert liegt. Transporte von bis zu 21 Tonnen finden lediglich für die Beförderung ab Raffinieren statt und sind deshalb deutlich seltener und für die vorliegende Betrachtung nicht relevant.

Bei den Chlortransporten wurde ebenfalls von den in Deutschland üblichen Transportmengen ausgegangen. Transporte von 20 Tonnen Chlor, wie sie im OECD/PIARC Modell berücksichtigt werden,

finden in Deutschland annähernd nicht statt<sup>26</sup> und unterliegen starken Auflagen<sup>27</sup>.

### 6.2.3 Abschätzung der Häufigkeit von Freisetzungen

Zur Erläuterung des Vorgehens zur Ermittlung der Raten von Unfällen mit Freisetzung wird nachfolgend beispielhaft die Ermittlung der als Hilfwerte zu verwendenden Werte (vgl. Tab. 6) dargelegt.

	Innerorts [1/10 <sup>8</sup> Fz-km]	Außerorts [1/10 <sup>8</sup> Fz-km]	BAB [1/10 <sup>8</sup> Fz-km]
Gefahrgutklasse 1	0,09	0,42	0,34
Gefahrgutklasse 2	0,03	0,15	0,12
Gefahrgutklasse 3	0,46	2,67	2,18

Tab. 6: Hilfwerte für Raten von Unfällen mit Freisetzung der betrachteten Gefahrgutklassen pro Straßentyp (offene Strecke)

#### Vorgehen

Anhand von statistischen Daten zur Fahrleistung von Gefahrguttransporten in Deutschland (BAST, StBA, KBA) sowie den statistischen Unfallraten bzw. Raten von Unfällen mit Freisetzung<sup>28</sup> im selben Zeitraum (BAST, StBA) werden Unfall- und Freisetzungsraten<sup>29</sup> ermittelt. Diese Raten werden nach Straßentyp<sup>30</sup> und Gefahrgutklasse differenziert.

Die Unfall- bzw. Freisetzungshäufigkeiten auf den untersuchten Streckenabschnitten lassen sich anschließend aus diesen Raten unter Berücksichtigung der Streckenabschnittslängen und dem prognostizierten Gefahrgutverkehr ermitteln.

<sup>26</sup> Nach Angaben von Herstellern, Großabnehmern und Bundesamt für Materialprüfung in Berlin werden Tanktransporte auf der Schiene durchgeführt. Die entsprechende Infrastruktur (Gleisanschluss) ist bei den Firmen vorhanden.

<sup>27</sup> Chlortransporte mit mehr als 1.000 kg Nettomasse je Beförderungseinheit auf der Straße sind nach [GGVSE 2006] § 7 i. d. R. nur bis zum nächsten Bahnhof oder Hafen genehmigungsfähig und unterliegen dann einer Streckenbindung.

<sup>28</sup> Die Begriffe Unfall- bzw. Freisetzungshäufigkeit bezeichnen die Anzahl Unfälle pro Jahr bzw. Unfälle mit Freisetzungen pro Jahr.

<sup>29</sup> Die Begriffe Unfallrate bzw. Rate von Unfällen mit Freisetzung bezeichnen die Anzahl Unfälle bzw. Freisetzungen pro Fahrzeugkilometer.

<sup>30</sup> Die Bundesanstalt für Straßenwesen bezeichnet die Straßentypen als ‚Ortslage‘ [BAST 1998].

Gefahrgutklassen	Anzahl der Transporte	Beförderte Gütermenge	Beförderungsleistung	Fahrleistung <sup>31</sup>
	[10 <sup>6</sup> ]	[10 <sup>6</sup> t]	[10 <sup>9</sup> tkm]	[10 <sup>8</sup> Fz-km]
1 Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff	0,1	1,4	–	0,15 <sup>32</sup>
2 Verdichtete, verflüssigte oder unter Druck gelöste Gase	1,8	11	1,2	2,0
3 Entzündbare flüssige Stoffe	8,1	109,7	9,3	6,9
4.1 Entzündbare feste Stoffe	0,2	1,2	–	–
4.2 Selbstentzündliche Stoffe	0,1	1,8	–	–
5.1 Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe	0,1	–	–	–
6.1 Giftige Stoffe	0,3	2,2	0,4	0,5
8 Ätzende Stoffe	1,0	7,6	1,2	1,6
9 Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	0,2	1,0	–	–
Übrige Klassen	0,1	0,8	1,0	1,1
Gefahrguttransport insgesamt	12	136	13	12
Gütertransport insgesamt	280	3.170	240	210

Tab. 7: Verkehrsaufkommen deutscher Kraftfahrzeuge<sup>33</sup> nach Gefahrgutklasse im Jahre 1995 [nach BAST 1998] (Werte gerundet)

	Innerorts		Außerorts		BAB		Insgesamt	Quelle
	[10 <sup>8</sup> Fz-km]	[%]	[10 <sup>8</sup> Fz-km]	[%]	[10 <sup>8</sup> Fz-km]	[%]	[10 <sup>8</sup> Fz-km]	
Gesamtverkehr	2,300	38	2,000	33	1,800	29	6,000	[BAST 1998b], [DVV 1999]
Schwerverkehr	210	35	140	24	250	41	600	[BAST 1998b], [DVV 1999], [StBA 1998]
Gefahrguttransport	4	35	3	24	5	41	12	Total: [BAST 1998a]

Tab. 8: Verteilung der Fahrleistung des deutschen Gesamt- und Schwerverkehrs auf die verschiedenen Straßentypen 1995. Ableitung der entsprechenden Verteilung für den Gefahrgutverkehr. (Werte gerundet)

### Fahrleistung

Die Fahrleistung des deutschen Gefahrguttransportes wird bereits aufgeschlüsselt nach Gefahrgutklassen einer Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen [BAST 1998a] entnommen. Tab. 7 gibt einen Überblick über den deutschen Gefahrguttransport von 1995; die Fahrleistung ist eine zusätzlich berechnete Größe. Einzelne Angaben stehen wegen zu kleiner Fallzahl und damit statistisch ungenügender Datenqualität nicht zur Verfügung.

<sup>31</sup> Die Fahrleistung leitet sich aus den ersten drei Größen ab: (Beförderungsleistung [tkm])\*(Anzahl der Transporte)/(Beförderte Gütermenge [t]) [BAST 1998a].

<sup>32</sup> [BAST 1998a] gibt aus Gründen der geringen Fallzahl für die Gefahrgutklasse 1 im Jahre 1995 keine Beförderungsleistung an. Im Jahre 1998 beträgt der Anteil der gefahrenen Fahrzeug-Kilometer der Klasse etwa 1,2%

Es stehen keine differenzierten Angaben über die Verteilung der Fahrleistung des Gefahrguttransportes auf die verschiedenen Straßentypen zur Verfügung. Die Verteilung der Fahrleistung des deutschen Schwerverkehrs ist jedoch ableitbar aus den Quellen [DEST 2004], [BAST 1998a], [BAST 1998b], [DVV 1999], [StBA 1998]. Unter der Annahme, dass der Gefahrguttransport sich nicht anders über die Straßentypen verteilt, berechnet sich die Fahrleistung des Gefahrguttransportes gemäß Tab. 8.

Die Fahrleistung kann nun für jede Kombination von Straßentyp und Gefahrgutklasse ermittelt werden. Dazu wird angenommen, dass die Verteilung

der Fahrleistung des gesamten Gefahrguttransportes [KBA 1998]. Dieser Wert wird gerundet als Schätzung für das Jahr 1995 übernommen.

<sup>33</sup> Die Tabelle umfasst sowohl den Straßengüterfernverkehr als auch den Straßengüternahverkehr.

lungen der Fahrleistung nach Straßentyp und Gefahrgutklasse voneinander unabhängig sind.

Den Anteil von kennzeichnungspflichtigen Gefahrguttransporten mit kleinen Fahrzeugen (unter 3,5 t Nutzlast) wird nach [DEST 2004] mit 0,45 Mrd. tkm abgeschätzt. Verglichen mit der gesamten Gefahrguttransportleistung von ca. 20 Mrd. tkm für Fahrzeuge über 3,5 t Nutzlast ist dies ein Anteil von ca. 2 % und kann in der weiteren Betrachtung vernachlässigt werden. Eine Abschätzung über den Anteil am Schwerverkehr ist damit zulässig.

#### Unfallraten / Raten von Unfällen mit Freisetzung

Das Statistische Bundesamt weist in seinen Statistiken die Anzahl der Unfälle und Freisetzungen in Deutschland differenziert nach Gefahrgutklasse aus. Tab. 9 stellt neben der Fahrleistung der Gefahrguttransporte die jeweilige Zahl von Unfällen und Freisetzungen gegliedert nach Gefahrgutklasse dar.

	Gefahrgutklasse				Gefahrgut- transp. gesamt
	1	2	3	Übrige	
Fahrleistung [10 <sup>8</sup> km]	0,15	2	6,9	3	12
Anzahl Unfälle <sup>34</sup>	4	46	289	86	425
Anzahl Freisetzungen	0,04 <sup>35</sup>	1	24	9	34

Tab. 9: Unfälle und Freisetzungen in Deutschland im Jahre 1995 nach Gefahrgutklassen [StBA 1999]

Die Aufteilung der Freisetzungen auf die Straßentypen basiert auf Werten aus [BAST 1998a]. Für das Jahr 1995 weist die Bundesanstalt für Straßenwesen in ihrem Bericht zwar keine gesonderte Aufteilung aus, kumuliert über die drei Jahre 1992 bis 1995 kann eine solche jedoch abgeleitet werden. Bei 103 der insgesamt 1.230 Unfälle während

<sup>34</sup> Die Unfallzahlen dienen nur bei der Gefahrgutklasse 1 als Ausgangspunkt für die Abschätzung der Freisetzungen. Bei den anderen Gefahrgutklassen können die Freisetzungshäufigkeiten direkt der Statistik entnommen werden. Die entsprechenden Unfallraten dienen lediglich der Plausibilitätskontrolle.

<sup>35</sup> Aufgrund der geringen Fallzahlen kann den Statistiken keine Freisetzungshäufigkeit für die Klasse 1 entnommen werden. Als Abschätzung wird angenommen, dass bei jedem hundertsten Unfall eine (relevante) Freisetzung erfolgt.

dieser vier Jahre gibt es einen Nachweis von ausgetretenem Gefahrgut. 12 % davon erfolgten innerorts, 37 % außerorts und 51 % auf Bundesautobahnen. Diese prozentuale Verteilung wird verrechnet mit dem Total der vom Statistischen Bundesamt ausgewiesenen 34 Unfälle mit Freisetzungen. Es ergeben sich somit 4 Unfälle mit Freisetzungen innerorts, 13 außerorts und 17 auf Bundesautobahnen.

Bei der Herleitung dieser Verteilung sind zwei Unsicherheiten zu beachten: Erstens müssen verschiedene Quellen mit verschiedenen Bezugsjahren miteinander verrechnet werden. Zweitens unterscheiden sich auch die Definition und die ausgewiesene Anzahl der Unfälle in den beiden Quellen. [BAST 1998a] weist für das Jahr 1995 insgesamt 28 Unfälle mit Personenschaden (UPS) aus, die zu einer Gefahrgutfreisetzung führten; der Mittelwert aus den Jahren 1992 bis 1995 beträgt 26. Gemäß [StBA 1999] entfallen 23 von 34 Unfällen mit Freisetzungen auf Unfälle mit Personenschaden, die übrigen 11 sind deklariert als Unfälle mit Freisetzungen, die zu schwerwiegenden Sachschäden i. e. S. führen (USS). Auch USS-Freisetzungen stellen aber grundsätzlich eine Gefährdung von Personen dar und sind deshalb für die Risikoanalyse zu berücksichtigen. Dabei wird angenommen, dass sich USS gleich auf die drei Straßentypen verteilen wie UPS.

Aus Tab. 10 sowie den obigen Zahlen zur Verteilung der Gefahrgutfreisetzungen auf die drei Straßentypen kann der Erwartungswert für die Zahl der Unfälle und Freisetzungen für jede Kombination von Straßentyp und Gefahrgutklasse ermittelt werden. Dazu wird angenommen, dass die Verteilungen von Unfall- und Freisetzungshäufigkeit nach Straßentyp und Gefahrgutklasse voneinander unabhängig sind. Tab. 10 zeigt die resultierende Matrix für die Zahl der Freisetzungen.

GG-Klasse	Innerorts	Außerorts	BAB	alle Straßen- typen
1	0,005	0,01	0,02	0,04
2	0,12	0,37	0,51	1
3	2,8	8,9	12,3	24
Übrige	1,0	3,3	4,6	9
über alle	4,0	12,6	17,4	34

Tab. 10: Anzahl Unfälle mit Freisetzungen gegliedert nach Gefahrgutklasse und Straßentyp für das Jahr 1995

Nicht jede Freisetzung ist als relevante Freisetzung einzustufen. Tritt nur wenig Gefahrgut aus, treten in

der Regel keine Todesfälle auf. Der Anteil an mengenmäßig relevanten Freisetzungen hängt erfahrungsgemäß von der Bauweise der Transportgefäße, der Transportart<sup>36</sup> und der durchschnittlichen Transportgeschwindigkeit ab. Demzufolge sind die Anteile nach Gefahrgutklasse und Straßentyp differenziert zu untersuchen. Die verwendeten Anteile sind in Tab. 11 einzusehen und beruhen auf der Auswertung von Unfallstatistiken sowie Expertenschätzungen.

Die Güter der Gefahrgutklassen 1 und 2 werden vorwiegend als Stückgut transportiert, im Falle der Klasse 2 auch in Tankwagen mit größerer Mindestwandstärke. Der Transport des Gefahrguts der Klasse 3 erfolgt hingegen vorwiegend in Tankwagen mit geringerer Mindestwandstärke, da der Tankinhalt im Gegensatz zu den Stoffen der Gefahrgutklasse 2 nicht unter Druck steht. Die bedingte Wahrscheinlichkeit einer wesentlichen Verletzung der Behälterwand einerseits und des Austritts eines größeren Volumens von Gefahrgut andererseits ist deshalb größer einzustufen als bei den Klassen 1 und 2. Diese Einschätzung deckt sich mit den internationalen Erfahrungen.

Mit höherer Fahrgeschwindigkeit steigen die kinetische Energie sowie der Impuls bei einem Aufprall und damit die bedingte Wahrscheinlichkeit einer relevanten Gefahrgutfreisetzung. Maßgeblich ist dieser Effekt bei den Transportgefäßen mit geringerer Mindestwandstärke der Gefahrgutklasse 3 zu erwarten, weshalb der Anteil der relevanten Freisetzungen bei dieser Klasse innerorts geringer ausfällt als außerorts oder auf der Autobahn. Für die Abschätzung der Freisetzungen für die Klasse 1 wurde der Aspekt der Relevanz bereits mit einbezogen und benötigt in Tab. 11 keine weitere Gewichtung.

GG-Klasse	Innerorts	Außerorts	BAB
2	20 %	20 %	20 %
3	40 %	50 %	50 %

Tab. 11: Anteil relevanter Freisetzungen

Wird der Aspekt der relevanten Freisetzungen (Tab. 11) mit Tab. 10 verrechnet, ergeben sich die Häufigkeiten relevanter Freisetzungen (Tab. 12).

GG-Klasse	Innerorts	Außerorts	BAB	alle Straßentypen
1	0,005	0,01	0,02	0,04
2	0,02	0,07	0,10	0,20
3	1,1	4,4	6,2	11,7

Tab. 12: Erwartungswert für die Zahl der Unfälle mit relevanter Freisetzung gegliedert nach Gefahrgutklasse und Straßentyp 1995 (gerundet)

Die Unfallraten bzw. Raten von Unfällen mit Freisetzung<sup>37</sup> (vgl. Tab. 4) ergeben sich durch die Division der Unfallhäufigkeiten bzw. der Häufigkeiten der Unfälle mit relevanten Freisetzungen durch die entsprechenden nach Straßentyp und Gefahrgutklasse differenzierten Fahrleistungen.

### 6.3 Stufe 2a - Tunnel

Die Stufe 2a dient dazu, einen Straßentunnel gemäß den Kategorien A - E nach ADR 2007 einzustufen. Die Zuordnung einer entsprechenden Tunnelkategorie erfolgt durch Bewertung der zu erwartenden Risiken mittels einer Vergleichsgrenze. Die Quantifizierung der objektspezifischen Risiken erfordert in einem ersten Schritt die Generierung von Ereignisabläufen zur Häufigkeitsermittlung. In einem zweiten Schritt sind dann für die jeweiligen Häufigkeiten Schadensausmaße mittels Modellrechnungen zu bestimmen. Im Folgenden wird das Vorgehen von der Ablaufmodellierung bis zur Risikobewertung und Kategorisierung erläutert sowie Anforderungen hinsichtlich des notwendigen Leistungsumfangs von numerischen Modellen formuliert.

#### 6.3.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung im Tunnel

Die Ablaufmodellierung erfolgt mit Hilfe von Ereignisbäumen. Hierzu werden ausgehend von einem Initialereignis Ereignisabläufe über Verzweigungen, welche die weitere Ereignisentwicklung beeinflussen, bis zum Erreichen eines Endzustandes gedanklich logisch nachgebildet. Bild 9 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

<sup>36</sup> Stückguttransport oder Transport in Tankwagen

<sup>37</sup> Relevante Freisetzungen

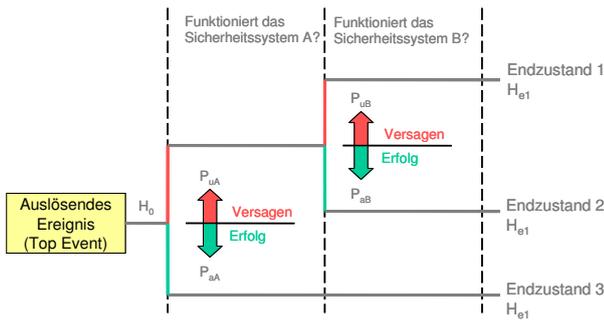


Bild 9: Beispiel für einen Ereignisbaum [MAHA 2003]

Die Häufigkeiten der Endzustände ergeben sich dann aus der Verknüpfung der Freisetzungshäufigkeit eines Leitstoffes nach Kapitel 6.2.3 mit den entsprechenden Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf. Wesentliche Verzweigungspunkte im Ereignisablauf bilden hierbei:

- Freisetzungsmenge (groß, klein)
- Art der Freisetzung (spontan, kontinuierlich)
- Zündung (sofort, verzögert, keine)
- Ereignisort (Einfahrtsbereich, Tunnelinnenstrecke)
- Zeitraum (Tag /Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr, Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Sperreinrichtung aktiviert (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja /nein)
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja /nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Fremdrettung

Für jeden einzelnen Verzweigungspunkt ist dessen Eintrittswahrscheinlichkeit auf Grundlage bekannter Versagenswahrscheinlichkeiten, mittels Fehlerbäumen oder durch Expertenwissen festzulegen. In nachfolgendem Bild 10 ist schematisch der prinzipielle Aufbau eines Fehlerbaumes dargestellt. Hierbei wird das Eintreten eines unerwünschten Ereignisses über logische Verknüpfungen von Unterereignissen beschrieben, welche die Ur-

chen für das Versagen bilden. Die Unterereignisse werden ihrerseits wieder durch logische Verknüpfungen auf weitere Unterereignisse zurückgeführt, bis die Ebene der Basisereignisse erreicht ist. Auf der Ebene der Basisereignisse besitzen die Ereignisse keine funktionellen Abhängigkeiten mehr. Die Fehlerbaumanalyse führt somit das definierte unerwünschte Ereignis durch logische Verknüpfungen auf Basisereignisse zurück, deren Eintrittswahrscheinlichkeit man kennt bzw. hinreichend zuverlässig abschätzen kann. Die Abbildung der logischen Verknüpfungen kann im einfachsten Fall mittels nachfolgend aufgeführten UND- bzw. ODER-Verknüpfungen der Booleschen Algebra erfolgen.

UND-Verknüpfung:

$$P_u = \prod_{i=1}^n P_{u,i} \tag{1}$$

ODER-Verknüpfung:

$$P_u = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{u,i}) \tag{2}$$

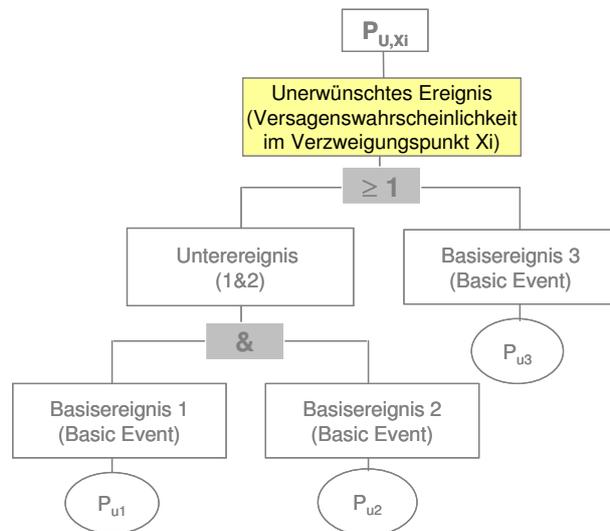


Bild 10: Beispiel eines Fehlerbaumes [MAHA 2003]

Im Folgenden werden Anhaltspunkte zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten im Ereignisablauf gegeben.

Wahrscheinlichkeit über die Art der Freisetzung

Hinsichtlich der Art der Freisetzung ist zu unterscheiden zwischen einer spontanen Freisetzung, bei der ein Großteil der Gefahrgutmenge durch das Platzen von Behältern innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls (Millisekunden bis wenige Sekunden) freigesetzt wird und einer kontinuierlichen Freisetzung, bei der aufgrund eines Lecks über einen

längeren Zeitraum (Minuten bis Stunden) eine Freisetzung erfolgt. Nachfolgende Tab. 13 beinhaltet Anhaltswerte zur Verteilung der Freisetzungarten für die Leitstoffe Benzin, Propan und Chlor, die ihre Wirkung über eine Freisetzung erzielen. .

Während die Werte für Benzin auf statistischen Auswertungen beruhen, basieren die Werte mit Propan- und Chlorfreisetzungen aufgrund mangelnder Datengrundlage auf Schätzungen.

Leitstoff	Freisetzung	
	spontan	kontinuierlich
Benzin	10 %	90 %
Propan	5 %	95 %
Chlor	5 %	95 %

Tab. 13: Verteilung der Freisetzungarten

#### Wahrscheinlichkeit einer Zündung

Szenarien mit zündfähigen Leitstoffen sind zu differenzieren in Fälle mit sofortiger, verzögerter und keiner Zündung. Des Weiteren ist zu unterscheiden zwischen Szenarien mit Freisetzung von zündfähigen Leitstoffen und Explosivstoffen. In den Fällen mit Freisetzung zündfähiger Stoffe ist ferner zu differenzieren zwischen Zündung bei einer spontanen und bei einer kontinuierlichen Freisetzung. Orientierungswerte zur Verteilung der Zündung sind in Tab. 14 für die Fälle mit spontaner Freisetzung und in Tab. 15 für die Fälle mit kontinuierlicher Freisetzung aufgeführt. Hierin spiegelt sich wieder, dass Propan bei spontaner Freisetzung in den überwiegenden Fällen zur sofortigen Zündung neigt.

Leitstoff	Zündung bei spontaner Freisetzung		
	sofort	verzögert	keine
Benzin	35 %	5 %	60 %
Propan	65 %	5 %	30 %

Tab. 14: Zündungsverteilung bei spontaner Freisetzung

Leitstoff	Zündung bei kontinuierlicher Freisetzung		
	sofort	verzögert	Keine
Benzin	15 %	5 %	80 %
Propan	25 %	5 %	70 %

Tab. 15: Zündungsverteilung bei kontinuierlicher Freisetzung

Tab. 16 enthält Anhaltswerte für die Zündverteilung bei Beteiligung von Explosivstoffen. Da zum Zünden von Explosivstoffen entweder sehr hohe Drücke, beispielsweise ausgelöst durch hohe kinetische Energieeinwirkung, oder sehr hohe Temperaturen, beispielsweise ausgelöst durch Brände, erforderlich sind, ist eine sofortige Zündung eher selten zu erwarten. In den meisten Fällen wird es daher zu einer verzögerten Zündung kommen.

Leitstoff	Zündung von Explosivstoffen		
	sofort	verzögert	Keine
TNT	10 %	60 %	30 %

Tab. 16: Zündungsverteilung bei Beteiligung von Explosivstoffen

#### Wahrscheinlichkeit des Ereignisortes

Die Wahrscheinlichkeit des Unfallortes ist abhängig von der Verteilung der Unfälle über die Tunnel-längsachse. Im Fall von Bestandstunnel ist diese über eine Analyse der Unfallanzeigen zu ermitteln. Im Fall von sich in der Planung befindlichen Tunnel lässt sich diese nur mittels mikroskopischer Verkehrsflusssimulationen abschätzen. Aufgrund der Unterschiede hinsichtlich Personenexposition und Fluchtmöglichkeiten ist hierbei mindestens zwischen den Bereichen der Einfahrtsstrecken und Tunnellinnenstrecken zu differenzieren

#### Wahrscheinlichkeit des Ereigniszeitpunktes

In Abhängigkeit des Ereigniszeitpunktes befinden sich aufgrund des tageszeitlichen Verlaufs des Verkehrsaufkommens unterschiedlich viele Fahrzeuge und somit Personen im Tunnel. Prinzipiell zu unterscheiden sind hierbei Zeiten mit hohem Verkehrsaufkommen und Schwachlastzeiten. Üblicherweise reicht hierbei eine Differenzierung zwischen Tagstunden (z. B. 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und der Nachtstunden (z. B. 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr) aus, wodurch sich bezogen auf 24 h eine Verteilung von 67 % an Tagstunden und 33 % Nachtstunden ergibt.

#### Wahrscheinlichkeit des Verkehrszustandes

Aufgrund unterschiedlicher Verkehrszustände variiert die Anzahl der potenziell betroffenen Tunnelnutzer. Zu unterscheiden sind hierbei Verkehrszustände bei freiem Verkehrsfluss und bei Stau bzw. stockendem Verkehr. Im Fall von Bestandstunnel lässt sich der Stauanteil über Verkehrszählungen ermitteln. Dagegen lässt sich der zu erwartende Stauanteil für sich in der Planung befindliche

Tunnel nur mit Hilfe von mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen hinreichend zuverlässig bestimmen, da diese insbesondere bei Tunneln mit hoher Anschlussstellendichte bzw. Ein- und Ausfahrten auch Einflüsse aus nachgeordneten Straßennetzen mitsamt gegebenenfalls vorhandenen Lichtsignalanlagen (LSA) -Steuerungen berücksichtigen können. Für Tunnel ohne besondere Stauneigung kann gegebenenfalls auch die Anzahl der Stautunden für die Bemessung nach Qualitätsstufe D [HBS 2001] herangezogen werden.

#### Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion

Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion ist von zahlreichen Faktoren abhängig und kann transparent und nachvollziehbar nur mittels Fehlerbaumanalysen erfolgen. Basisereignisse sind hierbei beispielsweise die Verfügbarkeit des Systems, die Energieversorgung etc. Der Wertebereich für eine erfolgreiche Detektion liegt üblicherweise zwischen 99 % und 99,999 %

#### Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Aktivierung der Sperreinrichtung

Zur nachvollziehbaren und transparenten Bestimmung der Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Aktivierung ist wiederum der Aufbau von Fehlerbäumen erforderlich. Wesentliche Komponenten (Basisereignisse) bilden hierbei, die Detektion, die Verfügbarkeit des Systems, die Energieversorgung etc. Der Wertebereich für eine erfolgreiche Aktivierung der Sperreinrichtung liegt üblicherweise zwischen 99% und 99,999%

#### Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Aktivierung des Lüftungssystems

Die Bestimmung einer Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Aktivierung des Lüftungssystems erfordert die Nachbildung der systembeeinflussenden Komponenten mittels Fehlerbäume. Wesentliche Komponenten sind hierbei beispielsweise die Detektion eines Ereignisses, die Lüftungssteuerung, die Energieversorgung etc. Der Wertebereich für eine erfolgreiche Aktivierung des Lüftungssystems liegt erfahrungsgemäß zwischen 99% und 99,999%.

#### Wahrscheinlichkeit eines erhöhten Ausmaßes

Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, mit in das Ereignis involviert sind. Die Wahrscheinlichkeit eines erhöhten Ausmaßes resultiert dann aus dem Anteil von Bussen am Gesamtverkehr.

#### Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Fremdrettung

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist ortsspezifisch als Eintreffwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Eintreffzeit zu ermitteln.

### **6.3.2 Ausmaßermittlung im Tunnel**

Aufgrund der sehr komplexen Wechselbeziehungen zwischen den geometrischen Verhältnissen, den Elementen der technischen Ausstattung, dem momentanen Verkehrszustand, der unterschiedlichen Wirkungsmechanismen von gefährlichen Stoffen sowie dem Verhalten von Tunnelnutzern sind zur Quantifizierung der Schadensausmaße und der Ermittlung von Maßnahmenwirksamkeiten räumlich und zeitlich hochauflösende Rechenmodelle erforderlich. Meist gelangen hierzu spezifische Rechenmodelle zum Einsatz, wie beispielsweise:

- Strömungs- und Ausbreitungsmodelle,
- Wirkungsmodelle,
- Flucht- und Evakuierungsmodelle
- Verkehrsflussmodelle<sup>38</sup>

bei deren Anwendung zur Berücksichtigung von Interaktionen Rechenergebnisse über entsprechende Schnittstellen austauschen können müssen.

Die im Folgenden aufgeführten Angaben zur Modellen und Berechnung sind sinnvoll auf das jeweilige Projekt zu adaptieren.

#### Modellanforderungen

##### 1. Strömungs- und Ausbreitungsmodell

Zur detaillierten Ermittlung der maßgeblichen Einwirkgrößen sind (je nach Leitstoff) raum- und zeitdiskrete Aussagen zu Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen sowie zu Sichtweiten erforderlich. Des Weiteren müssen Vorgänge der Wärmeübertragung sowie mehrere Phasen (fest, flüssig, gasförmig) und chemische Reaktionen abgebildet werden können.

Grundlage zur Beschreibung dieser Größen und Vorgänge bilden die kontinuierlich formulierten, zeitabhängigen Differentialgleichungen zur Massenerhaltung, Impulserhaltung, Energieerhaltung

<sup>38</sup> Insbesondere bei verkehrstechnischen Maßnahmen, die auf eine Reduzierung von Eintrittshäufigkeiten abzielen, ist eine Verkehrsflusssimulation sinnvoll anzuwenden.

und Stofferhaltung, deren Lösung aufgrund ihrer Komplexität nur mit numerischen Verfahren möglich ist.

Die realitätsnahe Abbildung der Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge erfordert die Lösung der Gleichungen

- für den instationären Fall,
- im 3-dim Raum,
- für kompressible Strömungen.

Ferner müssen Mehrkomponenten- und Mehrphasenströmungen abgebildet werden können und durch weitere Sub-Modelle die Berechnung von

- Turbulenzen (LES,  $k\epsilon$ -Modell),
- Bränden,
- Wärmeübertragung,
- Phasenübergänge und
- chemischen Reaktionen

möglich sein. Teil der Berechnung muss auch eine Darstellung der Eignung der verwendeten Rechenprogramme, bzw. Programmparameter (z. B. Zeitschritte) sein. Insbesondere ist zu belegen, dass die Lösung eindeutig ist und dass das Verfahren stabil ist.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind nachfolgend Programme aufgeführt, welche die Durchführung derartiger Berechnungen ermöglichen. Je nach Aufgabenstellung können Strömungsprogramme (CFD-Codes) oder auch Modelle zur Berechnung von Kurzzeitdynamiken (Hydrocodes) zum Einsatz kommen. Die Modelltypen sind nachfolgend entsprechend gekennzeichnet.

- AUTODYN (Hydrocode)
- CFX, vormals Flow 3D (CFD-Code)
- FDS – Fire Dynamics Simulator (CFD-Code)
- FLUENT (CFD-Code)
- LS DYNA (Hydrocode)
- PHOENICS (CFD-Code)
- OPEN FOAM (CFD-Code)

Für eine detailliertere Beschreibung der Modelle sei an dieser Stelle auf [MAY 2007] verwiesen.

## 2. Wirkungsmodelle

Mit Hilfe von Wirkungsmodellen lassen sich in Abhängigkeit der Einwirkgrößen Druck, Temperatur und jeweiliger Schadstoffkonzentration personenbezogenen Letalitäten<sup>39</sup> ermitteln.

In nachfolgendem Bild 11 sind die zu erwartenden Personenschäden in Abhängigkeit des Überdrucks dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass ab einem

Überdruck von 350 kPa sämtliche im Wirkungsreich befindliche Personen getötet werden.

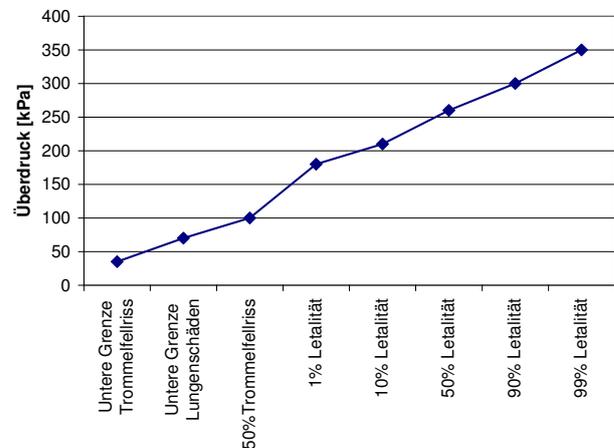


Bild 11: Personenschäden infolge Überdruck

Das nachfolgende Bild 12 zeigt die erwartenden Letalitäten infolge Temperatureinwirkung. Es zeigt sich, dass Temperaturen über 100 °C nur für einen sehr kurzen Zeitraum durch den menschlichen Organismus ausgehalten werden können.

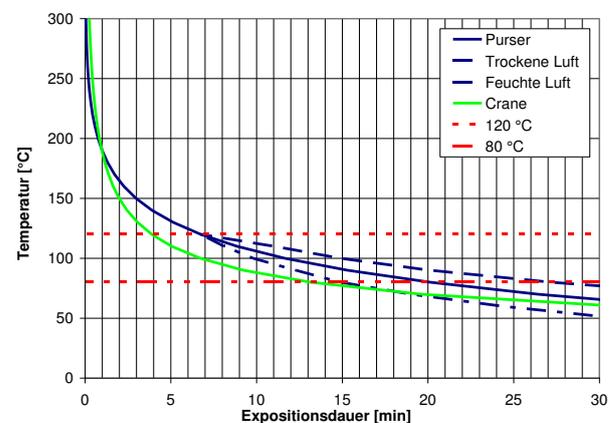


Bild 12: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung [MAY 2006]

Die Bestimmung von Letalitäten infolge Schadstoffexposition erfolgt z. B. auf Basis sog. Probit Funktionen<sup>40</sup>. Mit Hilfe des Integrals zur Dosis und der Probit Variable Y lassen sich die Grenzkonzentrationen in Abhängigkeit der Expositionsdauer und der zu erwartenden Letalitäten bestimmen. Die verwendeten Modelle sind darzustellen und ihre Eignung zu belegen.

<sup>39</sup> Letalität: Tödlichkeit eines Giftstoffes

<sup>40</sup> Probit-Funktionen: Mittels dem aus der Statistik bekannten Probitmodell berechnete funktionale Zusammenhänge zwischen Schadstoffkonzentrationen und Einwirkdauer in Abhängigkeit zu erwartender Letalitäten.

$$Dosis = \int_{t_0}^{t_{ende}} C^n dt \quad (3)$$

Mit:  
 C: Konzentration [ppm]  
 t: Expositionszeit [s]

Und der Probit-Variable Y

$$Y = k_1 + k_2 \ln(Dosis) \quad (4)$$

Mit:  
 $Y_{99} = 8$   
 $Y_{50} = 5$

Sowie der in Tab. 17 aufgeführten Probit Konstanten

Stoffbezeichnung	K1	K2	N
Chlor	-8,29	0,92	2,00
Kohlenmonoxid	-37,98	3,70	1,00

Tab. 17: Probit Konstanten

Ergeben sich beispielsweise die in Bild 13 dargestellten Letalitäten infolge Chlorexposition.

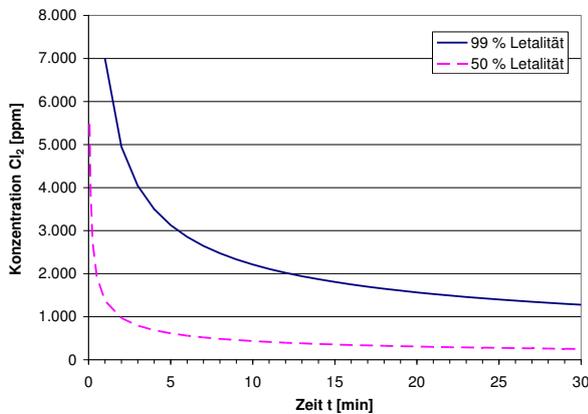


Bild 13: Letalitäten infolge Chlorexposition

### 3. Flucht- und Evakuierungsmodelle

Modelle zur Flucht und Evakuierungsermittlung dienen dazu, in Abhängigkeit unterschiedlicher Sicherheitseinrichtungen wie Lüftung, Notausgänge, Leiteinrichtungen, Kommunikationseinrichtungen etc. sowie unter Berücksichtigung der Einwirkungen auf den menschlichen Organismus (siehe Abschnitt 6.3.2 2. Wirkungsmodelle) Selbstrettungsbereiche bzw. einzelpersonenbezogen Schadensausmaße abzuleiten.

Flucht und Evakuierungsmodelle sollten soweit möglich zur realitätsnahen Abbildung wahrneh-

mungs- und verhaltenspsychologische Aspekte berücksichtigen können.

- EXODUS (kein wahrnehmungs- und verhaltensbasiertes Modell)
- EVAC (kein wahrnehmungs- und verhaltensbasiertes Modell)
- VISSIM Fußgängersimulation

Ein Beispiel für die Bestimmung von Selbstrettungsbereichen über Weg-Zweit-Linien zeigt Bild 14 für einen Notausgangsabstand von 150 m. Darin ergeben sich Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung (grüne Bereiche) aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung (gelbe Bereiche) bezeichnet. Keine Selbstrettung (rote Bereiche) ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann. Die verwendeten Modelle sind darzustellen und ihre Eignung zu belegen.

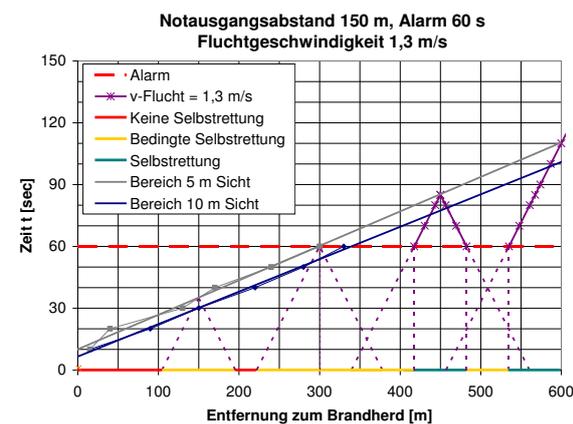


Bild 14: Selbstrettungsbereiche[MAY 2006]

### 4. Verkehrsflussmodelle (bei Bedarf)

Sind für die Zwecke der Risikoanalyse Abschätzungen aus statistischen Verkehrsdaten und / oder Annahmen nicht ausreichen, so können ergänzend Modelle zur Beschreibung des Verkehrsflusses zum Einsatz kommen, um über den Fahrzeugbesetzungsgrad für unterschiedliche Verkehrszustände die Anzahl potenziell betroffener Personen im Ereignisfall bestimmen zu können. Hierzu müssen

Einzelfahrzeuge in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen und Verkehrszusammensetzung abbildbar sein. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit sind nachfolgend entsprechende mikroskopische Verkehrsflusssimulationsmodelle aufgeführt

- AIMSUN
- PARAMICS
- VISSIM Verkehrsflusssimulation

Die verwendeten Modelle sind darzustellen und ihre Eignung zu belegen.

#### Modellierung des Tunnels

Um bei der Durchführung der numerischen Ausbreitungsberechnungen möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, ist ein Tunnel in seiner geometrischen Ausführung einschließlich des Gradientenverlaufs über seine gesamte Länge bzw. bei besonderen Randbedingungen auch über einen maßgebenden Abschnitt mitsamt seinen sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Ventilatoren, Absaugeinrichtungen, Detektionssysteme, Löscheinrichtungen einschließlich deren Regelungen und Steuerungen abzubilden. Als Rand- und Anfangsbedingungen sind ferner die leitstoffspezifischen Freisetzung sowie die Einflüsse aus Meteorologie vorzugeben. Des Weiteren sind szenarioabhängig die sich im Fahrraum befindlichen Fahrzeuge (Pkw, Lkw) mit abzubilden. Die der Berechnung zugrundeliegende Modellierung ist detailliert darzustellen. Die Qualität der Darstellung hat so hoch zu sein, dass eine Vergleichsrechnung mit einem anderen Rechenprogramm aufgrund der gleichen Modellierung möglich ist.

#### Ermittlung von Schadensausmaßen

Die Ermittlung der jeweiligen Schadensausmaße erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Ausbreitungsberechnung in Abhängigkeit des Verkehrszustandes durch Anwendung der Flucht- und Evakuierungsberechnungen. Schadensindikator bildet die szenarioabhängig zu bestimmende Anzahl an Todesopfern.

### 6.3.3 Risikoermittlung und Darstellung

Die Bestimmung der zu erwartenden Risiken erfolgt zunächst leitstoff- und szenarioabhängig über die ermittelten Ausmaße und Häufigkeiten. Durch anschließendes Zuordnen der Risiken einer entsprechenden Tunnelkategorie gemäß A bis E lassen sie sich entweder als Punktwert oder als HA-Diagramm darstellen (s. Hauptbericht). Zur besseren Vergleichbarkeit der Risiken zwischen einzelnen Tunneln werden die ermittelten Werte auf 1 km Länge normiert.

### 6.3.4 Risikobewertung und Kategorisierung

Zur Bewertung der Risiken bzw. um eine Kategorisierung durchführen zu können, sind Grenzkriterien erforderlich. International hat sich hierbei durchgesetzt, die Bewertung mittels Akzeptabilitätsgeraden gemäß nachfolgenden Zusammenhangs vorzunehmen.

$$H = c \cdot A^{-k} \quad (5)$$

Mit: H: Häufigkeit

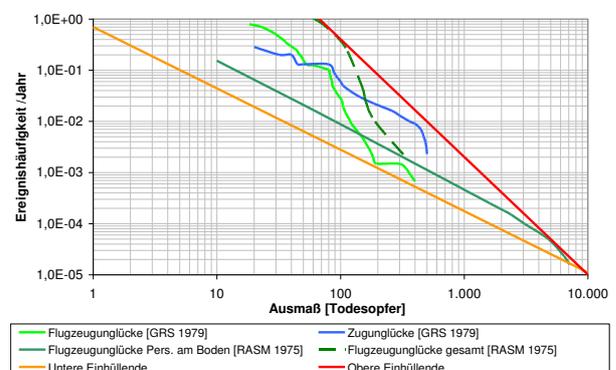
c: Konstante

A: Ausmaß

k: Neigung der Geraden bzw. Aversion

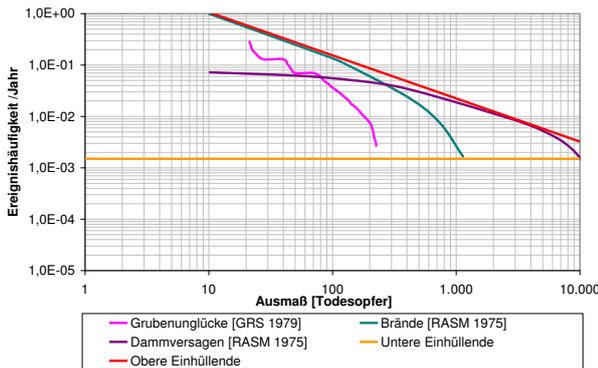
Die Bewertungskriterien müssen jedoch auf die zu untersuchenden Risiken abgestimmt sein. So können bei der Betrachtung von stationären Risiken, wie z. B. im Fall von Industrieanlagen, andere Bewertungsmaßstäbe notwendig werden als bei der Betrachtung von linienhaften Anlagen des Verkehrswesens, da hier Unterschiede im Ausmaß und in der Häufigkeit zu erwarten sind. Ferner ist zu differenzieren zwischen der Bewertung von Risiken mit Gefahrgut und ohne Gefahrgutbezug, da hier unterschiedliche Eintrittshäufigkeiten vorhanden sind.

In den nachfolgenden Bildern (Bild 15 bis Bild 17) sind Risiken auf Basis statistischer Daten zu Ereignissen aus Großbritannien, USA und weltweit als Häufigkeits-Ausmaßdiagramme dargestellt. In Bild 15 sind die Risiken für linienhafte Verkehrsträger ohne Beteiligung von Gefahrgütern dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass eine deutliche Variation insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Eintrittshäufigkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Analyse besteht. Durch untere und obere Einhüllende kann der Bereich der zu erwartenden Linienrisiken begrenzt werden.



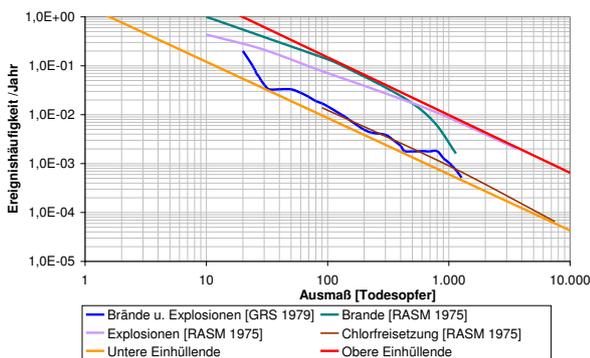
**Bild 15:** Linienrisiken aus Nicht-Gefahrgut [RASM 1975], [GRS 1979]

In Bild 16 sind die Risiken für stationäre Anlagen ohne Beteiligung von Gefahrgütern dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Eintrittshäufigkeit anlagenunabhängig durch eine untere Einhüllende begrenzt werden kann. Die resultierende Gerade mit einer Eintrittshäufigkeit von ca.  $1,0 \cdot 10^{-9}$  ist beispielsweise eine typische Risikobegrenzung im Bereich des Wasserbaus.



**Bild 16:** Stationäre Risiken aus Nicht-Gefahrgut [RASM 1975], [GRS 1979]

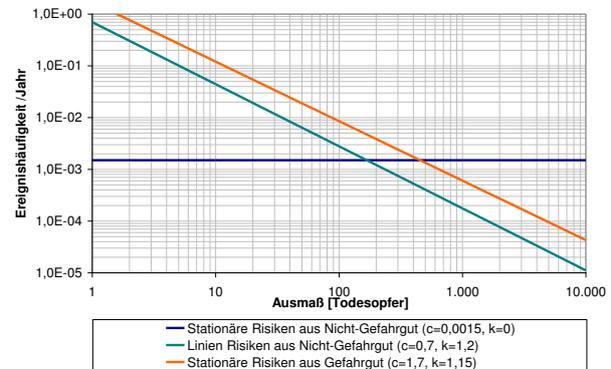
Für Risiken aus Gefahrgütern für linienhafte Anlagen sind keine belastbaren statistischen Auswertungen bekannt. In Bild 17 sind die Risiken aus Gefahrgütern für stationäre Anlagen dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass sich die ermittelten Risiken in einem eng begrenzten Korridor innerhalb parallel verlaufender einhüllender Geraden bewegen. Für stationäre Anlagen ließe sich somit ein Übergangsbereich für sämtliche Risiken ableiten.



**Bild 17:** Stationäre Risiken aus Gefahrgut [RASM 1975], [GRS 1979]

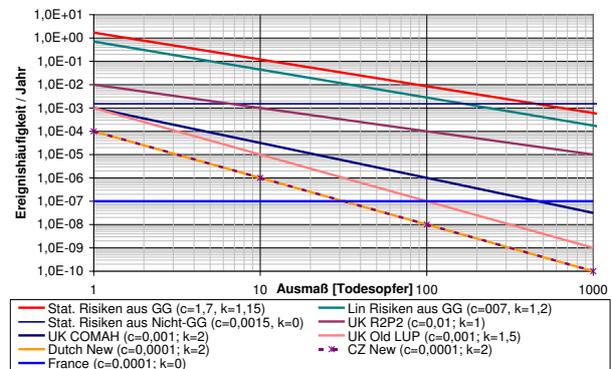
Zum Vergleich sind im nachfolgenden Bild 18 die unteren Einhüllenden für die statistisch ermittelten Risiken dargestellt. Es zeigt sich, dass die Eintrittshäufigkeit für linienhafte Anlagen signifikant unter der von stationären Anlagen mit Gefahrgütern liegt. Des Weiteren wird deutlich, dass zur Risikobewer-

tung anlagenspezifisch Maßstäbe gefunden werden müssen.



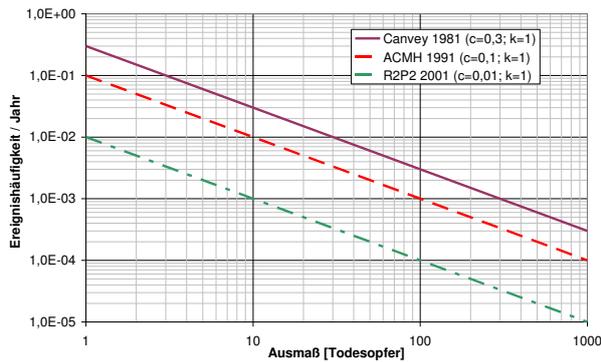
**Bild 18:** Untere einhüllende Geraden der Risiken

Eine Zusammenstellung der in den europäischen Ländern zur Bewertung von Risiken bei stationären Anlagen eingeführten Kriterien enthält Bild 19. Darin sind zum Vergleich die aus den statistischen Daten abgeleiteten unteren Einhüllenden ebenfalls dargestellt. Aus diesem Bild 19 wird deutlich, dass die Grenzkurven in Abhängigkeit des in den jeweiligen Staaten tolerierten Risikos zum Teil signifikant voneinander abweichen.



**Bild 19:** Grenzkrisiken für stationäre Anlagen [TRBO 2004]

Eine Variation der Grenzkrisiken resultiert auch aus einem über die Jahre gestiegenem Sicherheitsempfinden. Nachfolgendes Bild 20 zeigt, wie Grenzkrisiken für stationäre Anlagen in Großbritannien in der Zeit zwischen 1961 und 2001 angepasst wurden.

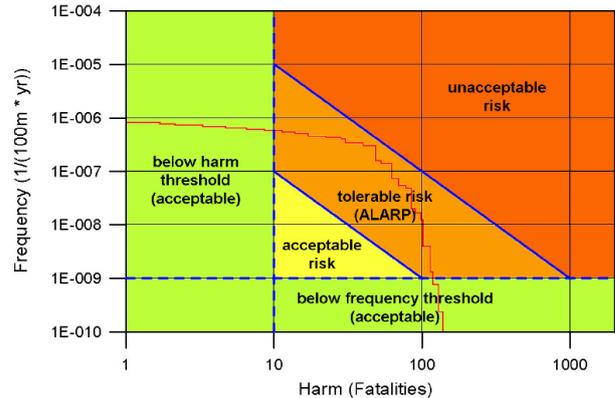


**Bild 20:** Veränderung der Grenzkrisiken für stationäre Anlagen in Großbritannien [TRBO 2004]

Zur Bewertung der Sicherheit von linienhaften Verkehrsanlagen hat sich zur einheitlicheren Bewertung der Risiken eine Normierung auf bestimmte Abschnittslängen etabliert. Die Schweizer Störfallverordnung sowie ein Beispiel in einem Positionspapier der Inland Transport Committee der UNECE berücksichtigen eine Normierung der Summenhäufigkeiten im HA-Diagramm auf  $1/(100 \text{ m} \cdot \text{a})$ .

In nachfolgendem Bild 21 ist das erwähnte Beispiel der UNECE zur Bewertung von Risiken bei linienhaften Verkehrsanlagen dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass zwischen Bereichen mit akzeptablen, tolerablen und nicht akzeptierbaren Bereichen unterschieden wird. Ferner werden Schadensausmaße mit weniger als 10 Todesopfer und Eintrittshäufigkeiten kleiner als  $10^{-9} \cdot 1/(100 \text{ m} \cdot \text{a})$  als akzeptabel dargestellt. Dies deckt sich auch mit Vorschlägen zur Risikobewertung im Bereich des Wasserbaus in Deutschland, in denen bis 20 Todesopfer von einem beschränkt akzeptablen Risiko ausgegangen wird.

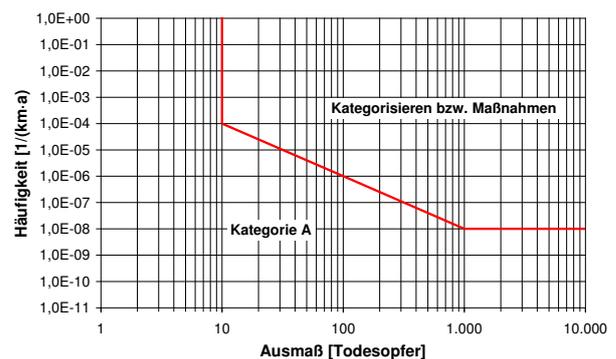
Für Risiken im Übergangsbereich der Darstellung aus dem UNECE - Papier zwischen akzeptablem und unakzeptablem Bereich liegt die sogenannte ALARP Region (ALARP = as low as reasonably practicable). In diesen Bereich fallenden Risiken sollen nochmals näher betrachtet und gegebenenfalls weitergehende Maßnahmen ergriffen werden.



**Bild 21:** Beispiel für ein Bewertungskriterium nach UNECE

Da ein Übergangsbereich keine eindeutige Bewertung ermöglicht und somit eine durchgängige Kategorisierung von Tunneln mit gleichen Bewertungsansätzen nicht möglich ist, wird als Bewertungskriterium die Verwendung ausschließlich einer Grenzgeraden vorgeschlagen. Des Weiteren wird in Anlehnung an bestehende Regelwerke des Straßenwesens empfohlen, eine Längennormierung der Summenhäufigkeiten auf  $1/(\text{km} \cdot \text{a})$  vorzunehmen.

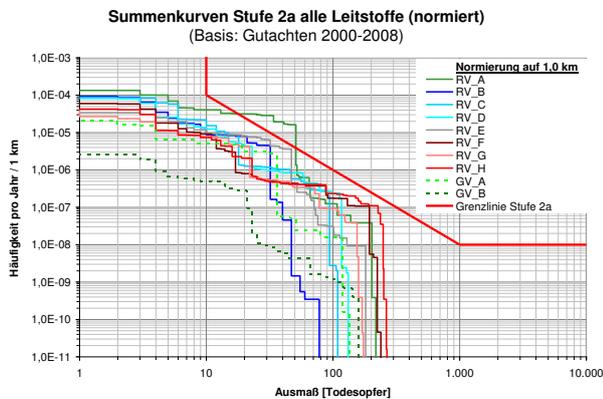
In nachfolgendem Bild 22 ist der Vorschlag zur Bewertung von Risiken mit Gefahrgutfreisetzung mit einem Grenzkriterium dargestellt, das konsistent zu den Grenzwerten in der Stufe 1b ist. Mit den Parametern  $c = 0,01$  und  $k = 2$  lässt sich mit Formel (5) die Vergleichsline in Bild 22 generieren.



**Bild 22:** Bewertungskriterium Stufe 2a mit Vergleichsgerade

Zur Überprüfung dieses Bewertungskriteriums werden 10 von der Forschergruppe in den Jahren von 2000 bis 2008 mittels quantitativer Risikoanalysen durchgeführte Gutachten zur Zulässigkeit von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel in Deutschland herangezogen. In nachfolgendem Bild 23 sind die in diesen Gutachten ermittelten Summenhäufigkeitslinien dem Vorschlag des

Bewertungskriteriums gegenübergestellt. Hieraus wird ersichtlich, dass lediglich ein Tunnel das Bewertungskriterium überschreitet.



**Bild 23:** Vergleichende Gegenüberstellung von 10 im Rahmen von Gefahrgutanalysen mit quantitativen Methoden durchgeführten Risikoberechnungen

Da diese Tunnel ebenfalls mit dem OECD/PIARC Modell untersucht wurden, zeigt sich dass kein in der Stufe 1 als sicher eingestuft Tunnel nach Stufe 2a kategorisiert werden müsste. Es treten somit keine verfahrensbedingte Unplausibilitäten auf.

## 6.4 Stufe 2b - Umfahrungsstrecke

### 6.4.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung Freifeld

#### 6.4.1.1 Leitstoff Benzin

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Mineralöl- bzw. Benzinfreisetzung werden im Hauptbericht für offene Strecken zu berücksichtigende Einflussgrößen vorgeschlagen. Ebenso wird dort das grundsätzliche Vorgehen für die Untersuchung der Umfahrungsstrecken beschrieben (Gliederung in Untersuchungseinheiten etc.). Diese sind anwendungsspezifisch zu prüfen bzw. gegebenenfalls zu ergänzen. Nachfolgend finden sich weitergehende Erläuterungen zu den einzelnen Einflussfaktoren:

#### Spontane / kontinuierliche Freisetzung

Anhand statistischer Abschätzungen in [PRA 1999] kann folgende Verteilung abgeschätzt werden: Bei 90% der Freisetzungen nach einem Unfall handelt es sich um eine kontinuierliche Freisetzung. Nur in 10% der Fälle kommt es zu spontanen Freisetzungen (Freisetzung, bei der der Großteil der im

Szenario berücksichtigten Gefahrgutmenge innerhalb sehr kurzer Zeit freigesetzt wird<sup>41</sup>.

#### Zündung

Zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeiten wurden in [PRA 1999] Unfalldaten statistisch ausgewertet, welche im Bedarfsfall verwendet werden können. Es ergaben sich daraus folgende Wahrscheinlichkeiten:

- Spontane Freisetzungen
  - Zündung sofort: 35 %
  - Zündung verzögert: 5 %
  - Keine Zündung: 60 %
- Kontinuierliche Freisetzungen:
  - Zündung sofort: 15 %
  - Zündung verzögert: 5 %
  - Keine Zündung: 80 %

#### Tag / Nacht

Je nach Tageszeit befinden sich unterschiedlich viele Personen auf der Straße bzw. im Freien oder in Gebäuden. Ferner ist auch das Verkehrsaufkommen abhängig von der Tageszeit. Der Zeitpunkt eines Unfalls hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Es ist im Sinne einer vereinfachenden Annahme davon auszugehen, dass der Anteil von Transportfahrzeugen mit dem Leitstoff Benzin am Gesamtverkehr unabhängig von der Tageszeit ist. Die Verteilung der Unfallhäufigkeit auf Tages- und Nachtzeit sollte gemäß der Verteilung des Verkehrsaufkommens in den entsprechenden Zeiträumen vorgenommen werden.

#### Brandbekämpfung und Unterstützung der Selbstrettung durch Ereignisdienste

Im Falle einer verzögerten Zündung oder nach einer kleinen Freisetzung (sofortige oder verzögerte Zündung) besteht für die Ereignisdienste die Möglichkeit der Unterstützung der Selbstrettung bzw. einer Evakuierung von Personen aus dem Gefahrenbereich (z. B. Anwohner in gefährdeten Gebäuden). Es sind Annahmen zu treffen, in wie vielen Fällen im Mittel durch die rechtzeitige Intervention das Schadenausmaß um einen bestimmten Anteil vermindert werden kann.

<sup>41</sup> Der Austritt druckverflüssigter Gase kann grundsätzlich in Gasphase oder Flüssigphase oder als Gemisch erfolgen. Je nach Leckgröße kann sich dabei vor der Evaporation eine Flüssigphasenlache am Freisetzungsort bilden, welche nachfolgend verdampft.

### Schadenausmaßverteilung

Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadenausmaß zu rechnen. Ähnlich kann sich das Schadenausmaß erhöhen, wenn zeitweilige andere Gründe zu einer Erhöhung der Personenexposition führen (Stau in der Gegenrichtung, zeitweilig intensiv genutzte Publikumsanlagen etc.). Im Bedarfsfall sind diese Aspekte in die Risikoanalyse einzubeziehen.

#### 6.4.1.2 Leitstoff Propan

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Propan werden im Hauptbericht für offene Strecken zu berücksichtigende Einflussgrößen vorgeschlagen. Diese sind analog zum Leitstoff Benzin anwendungsspezifisch zu prüfen bzw. gegebenenfalls zu ergänzen. Nachfolgend finden sich weitergehende Erläuterungen zu den einzelnen Einflussfaktoren:

#### Spontane / kontinuierliche Freisetzung

Statistische Grundlagen finden sich kaum hierzu. Es ist deshalb von Annahmen auszugehen. Vorgeschlagen wird die Annahme, dass es in 95% der Freisetzungen nach einem Unfall sich um eine kontinuierliche Freisetzung handelt, in 5% der Fälle um eine spontane Freisetzung (Freisetzung, bei der der Großteil der im Szenario berücksichtigten Gefahrgutmenge innerhalb sehr kurzer Zeit freigesetzt wird).

#### Zündung

Zur Bestimmung der Zündwahrscheinlichkeiten wurden in [PRA 1999] internationale Unfalldaten statistisch ausgewertet, welche im Bedarfsfall verwendet werden können. Es ergaben sich daraus folgende Wahrscheinlichkeiten:

- Spontane Freisetzungen
  - Zündung sofort: 65 %
  - Zündung verzögert: 5 %
  - Keine Zündung: 30 %
- Kontinuierliche Freisetzungen:
  - Zündung sofort: 25 %
  - Zündung verzögert: 5 %
  - Keine Zündung: 70 %

#### Meteorologische Verhältnisse

Für die Schadenwirkungsart Gaswolkenbrand bzw. Gaswolkendeflagration oder -detonation sind hinsichtlich der Gasausbreitung die meteorologischen Verhältnisse von Bedeutung. Entsprechend den ortsspezifischen Verhältnissen sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Situation Windstille

(bzw. sehr geringe Windgeschwindigkeit) oder Wind sowie die Verteilung der verschiedenen Windrichtungen zu berücksichtigen. Als Grundlage zur Abschätzung werden üblicherweise Windrosen von nahegelegenen Meteostationen herangezogen und die Angaben für pragmatisch in die vier Himmelsrichtungen aufgeteilt.

#### Tag / Nacht

Je nach Tageszeit befinden sich unterschiedlich viele Personen auf der Straße bzw. im Freien oder in Gebäuden. Ferner ist auch das Verkehrsaufkommen abhängig von der Tageszeit. Der Zeitpunkt eines Unfalls hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Es ist im Sinne einer vereinfachenden Annahme davon auszugehen, dass der Anteil der Leitstoff Propan Transportfahrzeuge am Gesamtverkehr unabhängig von der Tageszeit ist. Die Verteilung der Unfallhäufigkeit auf Tages- und Nachtzeit sollte gemäß der Verteilung des Verkehrsaufkommens in den entsprechenden Zeiträumen vorgenommen werden.

#### Evakuierung, Brandbekämpfung und Unterstützung der Selbstrettung durch Ereignisdienste

Im Gegensatz zum Leitstoff Benzin sind die Interventionsmöglichkeiten für die Ereignisdienste geringer. Im Wesentlichen beschränken sie sich auf die Evakuierung von gefährdeten Personen (bei verzögerter Zündung). Bei einer sofortigen Zündung bestehen i. d. R. kaum Interventionsmöglichkeiten. Die Wirkung ist primär über Annahmen abzuschätzen.

#### Schadenausmaßverteilung

Es gelten dieselben Überlegungen wie für den Leitstoff Benzin. Es ist zu berücksichtigen, dass die Wirkdistanzen für Propan i. d. R. größer sind als für den Leitstoff Benzin und damit im Vergleich zum Leitstoff Benzin potenziell in größeren Bereichen Personen betroffenen sein können.

#### 6.4.1.3 Leitstoff Chlor

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Chlor werden im Hauptbericht für offene Strecken zu berücksichtigende Einflussgrößen vorgeschlagen. Diese sind anwendungsspezifisch zu prüfen bzw. gegebenenfalls zu ergänzen. Nachfolgend finden sich weitergehende Erläuterungen zu den einzelnen Einflussfaktoren:

### Spontane / kontinuierliche Freisetzung

Statistische Grundlagen finden sich kaum hierzu. Es ist deshalb – wie für den Leitstoff Propan – von Annahmen auszugehen. Vorgeschlagen wird die Annahme, dass es in 95% der Freisetzungen nach einem Unfall sich um eine kontinuierliche Freisetzung handelt, in 5% der Fälle um eine spontane Freisetzung (Freisetzung, bei der der Großteil der im Szenario berücksichtigten Gefahrgutmenge innert sehr kurzer Zeit freigesetzt wird).

### Meteorologische Verhältnisse

Das Ausbreitungsverhalten einer sich ausbreitenden Chlorgaswolke wird stark von den atmosphärischen Bedingungen beeinflusst. Entsprechend den ortsspezifischen Verhältnissen sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Situation Windstille (bzw. sehr geringe Windgeschwindigkeit) oder Wind sowie die Verteilung der verschiedenen Windrichtungen zu berücksichtigen. Das Vorgehen hierzu ist analog zu demjenigen für den Leitstoff Propan.

### Tag / Nacht

Je nach Tageszeit befinden sich unterschiedlich viele Personen auf der Straße bzw. im Freien oder in Gebäuden. Ferner ist auch das Verkehrsaufkommen abhängig von der Tageszeit. Der Zeitpunkt eines Unfalls hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Es ist im Sinne einer vereinfachenden Annahme davon auszugehen, dass der Anteil der Leitstoff Chlor Transportfahrzeuge am Gesamtverkehr unabhängig von der Tageszeit ist. Die Verteilung der Unfallhäufigkeit auf Tages- und Nachtzeit sollte gemäß der Verteilung des Verkehrsaufkommens in den entsprechenden Zeiträumen vorgenommen werden.

### Evakuierung, Ausmaßminderung durch Ereignisdienste

Die Interventionsmöglichkeiten für die Ereignisdienste sind bei einer Chlorgasfreisetzung nur sehr beschränkt. Es bedarf dazu spezieller Ausrüstungen, um sich überhaupt in den Gefahrenbereich begeben zu können. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass nur in wenigen Fällen eine erfolgreiche Intervention durch die Ereignisdienste stattfindet und das Ausmaß entsprechend reduziert werden kann. Im Vordergrund steht hierbei primär die Betreuung von Verletzten.

### Schadenausmaßverteilung

Es gelten dieselben Überlegungen wie für den Leitstoff Propan. Dabei sind wiederum die Wirkdistanzen für die berücksichtigten Freisetzungsszena-

rien zu berücksichtigen. Diese können, je nach Topographie und Umgebung für große Freisetzungsmengen mehrere hundert Meter betragen.<sup>42</sup>

#### 6.4.1.4 Leitstoff TNT

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes TNT werden im Hauptbericht für offene Strecken zu berücksichtigende Einflussgrößen vorgeschlagen. Diese sind wie für alle Leitstoffe anwendungsspezifisch zu prüfen bzw. gegebenenfalls zu ergänzen. Nachfolgend finden sich weitergehende Erläuterungen zu den einzelnen Einflussfaktoren:

### Tag / Nacht

Je nach Tageszeit befinden sich unterschiedlich viele Personen auf der Straße bzw. im Freien oder in Gebäuden. Ferner ist auch das Verkehrsaufkommen abhängig von der Tageszeit. Der Zeitpunkt eines Unfalls hat deshalb einen Einfluss auf das jeweilige Ausmaß. Es ist im Sinne einer vereinfachenden Annahme davon auszugehen, dass der Anteil der Leitstoff TNT Transportfahrzeuge am Gesamtverkehr unabhängig von der Tageszeit ist. Die Verteilung der Unfallhäufigkeit auf Tages- und Nachtzeit sollte gemäß der Verteilung des Verkehrsaufkommens in den entsprechenden Zeiträumen vorgenommen werden.

### Evakuierung, Ausmaßminderung durch Ereignisdienste

Die Wirkung der Interventionsmöglichkeiten von Ereignisdiensten ist primär über Annahmen abzuschätzen. Im Vordergrund stehen die Aspekte der Evakuierung, die Brandbekämpfung (z. B. bei Brand eines Explosivstoff-Transportfahrzeuges), die Betreuung von Verletzten nach einem Ereignis sowie die Bewältigung von Sekundäreignissen etc.

### Schadenausmaßverteilung

Es gelten dieselben Überlegungen wie für die übrigen Leitstoffe. Zu berücksichtigen sind hierbei wiederum die szenario- bzw. leitstoffspezifischen Wirkdistanzen. Ferner sind in den Überlegungen auch mögliche geschützte bzw. besonders exponierte Bereiche zu berücksichtigen (z. B. Schutzwirkungen durch Topographie etc.).

<sup>42</sup> Modellrechnungen zeigen beispielsweise, dass für den Fall einer Freisetzung von 4 Tonnen Chlor Wirkdistanzen (1 % Letalitätsgrenze für Personen im Freien) von bis zu 800 m resultieren können.

## 6.4.2 Ausmaßermittlung Freifeld

### 6.4.2.1 Generelle Aspekte zur Ermittlung der Personenschäden

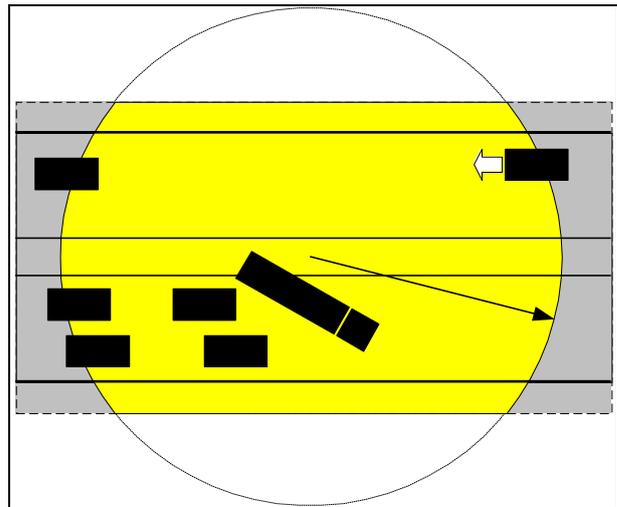
Für die Ermittlung der resultierenden Personenschäden sind grundsätzlich die beiden folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Leitstoff- und szenariospezifische Wirkdistanz: Im Zuge der praktischen Umsetzung werden normalerweise die Bereiche jeweils nach Wirkung bzw. Letalität bereichen unterteilt (z. B. 100 % Letalität, 50 % Letalität und 1 % Letalität). Dazu können verschiedene Modelle und so genannte Probitfunktionen verwendet werden (s. z. B. Formeln (3) und (4)). Zusätzlich sind jeweils auch die Schutzwirkung von Gebäude- und Fahrzeughüllen und topographischer Gegebenheiten und ähnlichem zu berücksichtigen.
- Exposition von Personen im Wirkungsbereich: In der Praxis hat sich die Unterscheidung folgender Personengruppen bewährt:
  - Verkehrsteilnehmer: Personen, welche sich auf der Straße im Wirkungsbereich aufhalten. Hierbei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass sich nach einem Unfall ein Stau bilden und damit die Zahl der exponierten Verkehrsteilnehmer erhöhen kann.
  - Anwohner und Arbeitende: Zur Ermittlung der Zahl der exponierten Personen kann normalerweise auf statistische Grundlagen zurückgegriffen werden.
  - Personen im Freien und Personen in Publikumsanlagen

Nachfolgend finden sich ergänzende Hinweise für die vier berücksichtigten Leitstoffe.

### 6.4.2.2 Leitstoff Benzin

Im Folgenden sind weitergehende Modellparameter zur Ausmaßabschätzung für den Leitstoff Benzin aufgeführt. Im Vordergrund stehen die den jeweiligen Freisetzungsmengen entsprechenden Lachengrößen sowie die zugehörigen Wirkungsradien und Letalitäten infolge der Wärmestrahlung, die in Abhängigkeit des Abstandes z. B. nach [TNO 1997] oder [CARB 1992] bestimmt werden können.



**Bild 24:** Beispiel einer Lachenbildung (modellhafte Darstellung)

Bei der Ermittlung der Wirkdistanzen ist die Schutzwirkung von Fahrzeug- und Gebäudehüllen zu berücksichtigen. Weist ein Streckenabschnitt ein erhebliches Gefälle auf (Rampenbereiche zum Tunnel), so ist die ermittelte Lachengröße mittels eines Korrekturfaktors von (i. d. R. basierend auf einer pragmatischen Annahme) anzupassen.

Für die Berücksichtigung einer eventuelle nachfolgenden Kanalisationsexplosion ist abzuschätzen, welche Bereiche hiervon im spezifischen Fall betroffen sein können.<sup>43</sup>

### 6.4.2.3 Leitstoff Propan

Für die Ermittlung der Schadenausmaße für den Leitstoff Propan sind die unterschiedlichen Wirkarten zu unterscheiden:

#### Feuerball/BLEVE

In diesem Bericht bezeichnet Feuerball oder BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) die spontane Freisetzung eines verflüssigten, brennbaren Gases aus einem Druckbehälter unter Bildung eines (im Freien aufsteigenden) Feuerballs. Für die Gefährdung von Personen ist in erster Linie die thermische Strahlung verantwortlich, die je nach freigesetztem Gasvolumen 5 bis 20 Sekunden andauert.

<sup>43</sup> Hierbei spielen beispielsweise Interventionen und Maßnahmen zur Verhinderung der Ausbreitung eine Rolle. Für die Ermittlung der möglichen Wirkungen ist in der Regel aus Praktikabilitätsgründen von pragmatischen Annahmen auszugehen.

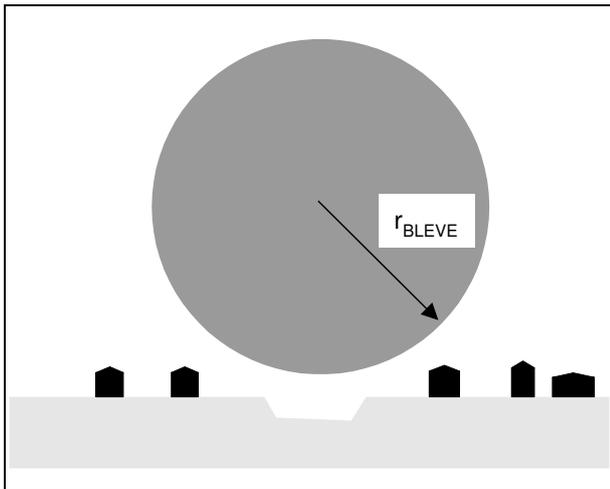


Bild 25: Schematische Darstellung eines BLEVE

#### Gaswolkenbrand bzw. Gaswolkendeflagration oder -detonation

Diese Bezeichnung beschreibt die Entzündung und den Abbrand einer brennbaren Gemischwolke. Der Abbrand geschieht in der Regel nicht explosionsartig, erzeugt also primär Wärme und i. A. keine maßgeblichen Druckwirkungen. In Fällen mit Verdämmung (eng stehende Bauten o. ä.) können Turbulenzen zu Flammengeschwindigkeiten führen, welche Druckwirkungen erzeugen können (Gaswolkendeflagration oder -detonation).

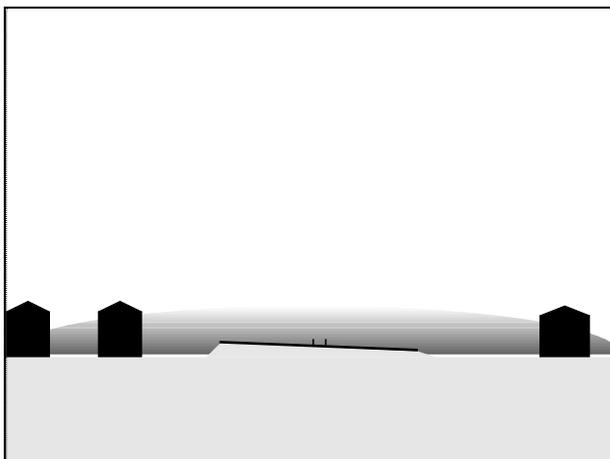


Bild 26: Schematische Darstellung eines Gaswolkenbrands

#### Freistrahbrand

Bei einem Leck geringen Durchmessers in einem Druckbehälter mit verflüssigten Gasen tritt der Stoff gasförmig mit sehr hohen Geschwindigkeiten aus. Im Falle einer Entzündung entsteht ein Feuerstrahl, der Reichweiten von einigen zehn Metern erreichen kann.

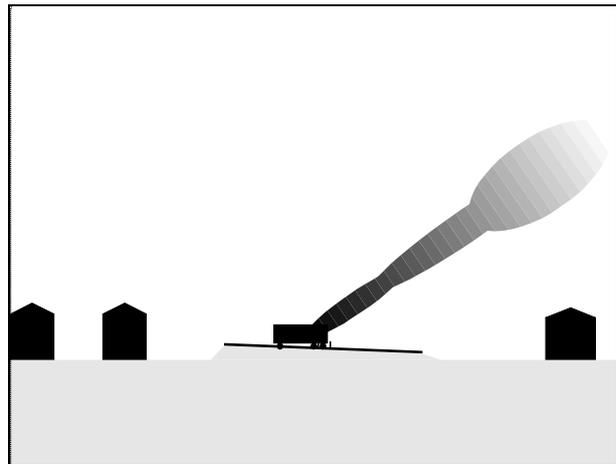


Bild 27: Schematische Darstellung eines Freistrahbrandes

#### Ausbreitung und Wirkbereiche

Die Ausbreitung, die entsprechenden Wirkungsbereiche und Letalitäten für die drei Wirkungsarten können z. B. nach [RBFT 1992], [BUWAL 1996] und [TNO 1997] bestimmt werden. Um die Schutzwirkungen von Fahrzeug- und Gebäudehüllen zu abzuschätzen finden sich beispielsweise in [RBFT 1992] und [BUWAL 1996] Angaben.

#### Intervention

Bei einer rechtzeitigen Intervention und Brandbekämpfung durch Ereignisdienste kann eine Eskalation (z. B. Entstehung eines BLEVE aus einem Freistrahbrand) verhindert, Personen aus dem Gefahrenbereich evakuiert und verletzte Personen gerettet werden. Dies führt zu einer Minderung des Schadensmaßes. Diese Aspekte werden i. d. R. mittels Annahmen abgeschätzt.

#### 6.4.2.4 Leitstoff Chlor

Chlor zeigt bei der Ausbreitung ein ausgeprägtes Schwergasverhalten. Für die Berechnung einer Schwergasausbreitung existieren verschiedene computergestützte Modelle. Viele Modelle gehen vereinfachend von Freisetzungen in einer idealen Ebene aus. Topographische Unregelmäßigkeiten, wie Einschnitte, Hanglagen oder große Gebäude lassen sich bei diesen Modellen nicht oder nur beschränkt über die Umgebungsrauigkeit berücksichtigen. Es ist deshalb fallweise zu entscheiden, ob entsprechende Modelle für die spezifische Anwendung geeignet sind, oder ob dreidimensionale Modelle zu verwenden sind, deren Einsatz aber entsprechend mehr Aufwand erfordert.

Die mit der Ausbreitungsrechnung bestimmte Chlor-Konzentration ermöglicht die Berechnung der aufgenommenen Chlorgasdosierung exponierter Per-

sonen. Basierend darauf kann über eine Probitfunktion die erwartete Letalität abgeschätzt werden. Zu berücksichtigen ist dabei das ausgeprägte Schwergasverhalten von Chlor. Dieses hat zur Folge, dass (bei schwachen Windverhältnissen) die größten Gaskonzentrationen in Bodennähe zu verzeichnen sind bzw. dass entlang eines Gefälles die Ausbreitung auch gegen die Windrichtung möglich ist.

#### 6.4.2.5 Leitstoff TNT

Für die Ermittlung des Schadenausmaßes nach einer Detonation sind einerseits der Spitzenüberdruck der Stoßwelle und andererseits der Spitzenüberdruck und die Stoßdauer des Luftstoßes (Impuls) maßgebend. Die Wirkungsradien der Detonation werden üblicherweise mit der 1%-Letalitätsgrenze gleich gesetzt, auch wenn durch Trümmerwurf noch Todesfälle außerhalb dieser Zone vorkommen können.

Bei Explosionen führen topographische Gegebenheiten und Gebäude- und Fahrzeughüllen zu einer Minderung der Wirkungen. Diese sind entsprechend in die Ausmaßermittlung mit einzubeziehen. Daraus resultieren unterschiedliche Wirkungsradien für Personen im Freien, in Fahrzeugen oder in Gebäuden.

Für die Ausmaßermittlung aufgrund der Wirkungen von Explosivstoffen existieren anerkannte Modelle zur Bestimmung der Wirkungen (z. B. [LS 2000]). Es ist fallweise festzulegen, welchen Detaillierungs- bzw. Auflösungsgrad die zu verwendenden Modelle aufweisen müssen, um das Schadenausmaß hinreichend abschätzen zu können.

## Literaturverzeichnis

- [ADR 2007]: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, 1. Januar 2007
- [ADR 2009]: 19. Verordnung zur Änderung der Anlagen A und B zum ADR-Übereinkommen (19. ADR-Änderungsverordnung – 19. ADRÄndV) und Anlagen, BGBl 11. September 2008
- [AMUN 1997]: Amundsen, F.; Ranæs, G.  
Traffic Accidents and Carfires in Norwegian Road Tunnels in: Safety in Road and Rail Tunnels. Third International Conference Nice, France, 9-11 March 1998. Bedford, 1998
- [ASTR 2004] Bundesamt für Strassen ASTRA  
Richtlinie  
Lüftung der Strassentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung  
Ausgabe 2004
- [BAST 1998a]: Pöppel-Decker, Martin  
Straßenverkehrsunfälle beim Transport gefährlicher Güter 1992 bis 1995, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, 1998
- [BAST 1998b]: Straßenverkehrszählung 1995. Statistik 1: Jahresfahrleistung und mittlere DTV. Auszug erhalten per Fax von der BAST (21.9.00)
- [BAST 2007]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe; FE 03.0378/2004/FRB Sicherheitsbewertung von Straßentunneln, abgeschlossen, Schlussbericht Februar 2007 (noch nicht veröffentlicht)
- [BAST 2008]: Zulauf, Baltzer, Mayer, Zimmermann, Kündig, Steinauer, Riepe; Leitfaden für Sicherheitsbewertungen gemäß RABT 2006, März 2008 (noch nicht veröffentlicht)
- [BUWAL 1996]: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL); Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage; Störfallverordnung. Stand: Mai 1996
- [CARB 1992]: Rahmenbericht über Stehtankanlagen für flüssige Brenn- und Treibstoffe im Hinblick auf die Störfallvorsorge, SKS Ingenieure AG, Zürich 1992
- [CETU 2000] Circulaire interministérielle n°2000-82  
Relative à la réglementation des la circulation des Véhicules transportant des marchandises dangereuses dans les tunnels du réseau routier national  
25 August 2000
- [CETU 2003] Centre d'Etudes des Tunnels  
Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers  
Fascicule 4, Les études spécifiques des dangers (ESD)  
ENTWURF, September 2003
- [DEST 2004]: Statistische Bundesamt DESTATIS  
Schätzung der Gefahrguttransporte der Eisenbahn, der Binnen- und der Seeschifffahrt für zwei aktuelle Jahre sowie Untersuchung der Einbeziehung des Straßengüterverkehrs in das Schätzverfahren  
Mai 2004
- [DVV 1999]: Deutscher Verkehrsverlag  
Verkehr in Zahlen 1999
- [EG 2004]: Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union  
Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz  
29. April 2004
- [EGKO 2005]: Kommission der Europäischen Gemeinschaft  
Bericht 430 der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Anwendung der Richtlinie 95/50/EG des Rates über einheitliche Verfahren für die Kontrollen von Gefahrguttransporten auf der Straße durch die Mitgliedstaaten; 2005
- [EGKO 2007]: Kommission der Europäischen Gemeinschaft  
Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Anwendung der Richtlinie 95/50/EG des Rates über einheitliche Verfahren für die Kontrolle von Gefahrguttransporten auf der Straße durch die Mitgliedsstaaten *KOM (2007) 795 endgültig*  
Dezember 2007
- [GGVSE 2006]: Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße und mit Eisenbahnen (Gefahrgutverordnung Straße und Eisenbahn - GGVSE), 2006
- [GRS 1979]: Gesellschaft für Reaktorsicherheit; Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke (DRS-A), 1979
- [HBS 2001]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen; HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen Heft 299,  
Ausgabe 2001, Fassung 2005
- [INER 2005a]: INERIS; Research Report N°20504 Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Moel (versions 3.60 and 3.61)  
Reference Manual, August 2005

- [INER 2005b]: INERIS; Research Report N°20504 Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Moel (versions 3.60 and 3.61)  
User Guide, Dezember 2005
- [KBA 1998]: Statistische Mitteilungen des KBA und des BAG Reihe 8, Heft 12/1998. Übersicht 10 (kum) Verkehrsleistung deutscher Lastkraftfahrzeuge von Januar bis Dezember 1998 nach Gefahrgutklassen. Gesamtverkehr – Fahrten mit Ladung (alle Verkehrsarten)
- [LS 2000] Anet, B.; Binggeli, E.(unter Mitarbeit von Ernst Basler + Partner AG)  
Luftstosspänomene infolge nuklearer und konventioneller Explosionen  
Gruppe Rüstung, AC-Laboratorium Spiez  
Januar 1998
- [MAHA 2003]: Mayer, G., Haastert J.: Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43.
- [MAY 2006]: Mayer, G. (2006)  
Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstentzündungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation  
Dissertation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- [MAY 2007]: Mayer, G.; Steinauer, B.; Kündig, P.: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 57, September 2007
- [OECD 2001]: Organisation for Economic Co-Operation and Development OECD, World Road Association PIARC; Safety in Tunnels – Transport of Dangerous Goods through Road Tunnels  
Ausgabe 2001
- [PIARC 2008]: PIARC C 3.3; Analyse des Risques pour les Tunnels Routiers / Risk Analysis for Road Tunnels, 2008
- [PIARC 2009]: Vertrieb des OECE/PIARC QRAM über <http://publications.piarc.org/ressources/documents/QRAM-OrderForm-Jan07.doc>  
Stand Januar 2007
- [RABT 2006]: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit  
Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln – RABT  
Ausgabe 2006
- [RASM 1975] Rasmussen, Norman et al. "Reactor Safety Study." WASH-1400. Washington DC: U.S. NRC, 1975.
- [RBFT 1992]: Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen; Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge; Basler & Hofmann, Zürich, 1992
- [PRA 1999]: Unterarbeitsgruppe „Beurteilungskriterien Verkehrswege“  
Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter  
Fallbeispiel Autobahn  
August 1999
- [StBA 1998]: Statistisches Bundesamt (StBA)  
Straßenlänge nach Ortslage und Fahrleistung 1960-98 nach Kraftfahrzeugarten  
Fachserie 8, Reihe 7, 1998. Auszug erhalten per Fax von StBA (8.8.00)
- [StBA 1999]: Statistisches Bundesamt (StBA)  
Straßenverkehrsunfälle – Zeitreihen: Beteiligte Kraftfahrzeugführer von Gefahrguttransporten nach Gefährklasse der Ladung.  
Auszug erhalten per Fax von StBA (8.8.00)
- [STEI 2002]: Steinbrecher, J; Ellinghaus, D; LKW im Straßenverkehr - Eine Untersuchung über die Beziehungen zwischen Lkw- und Pkw-Fahrern; Uniroyal Verkehrsuntersuchung 27; Hannover 2002
- [STFV 2000]: SR 814.012  
Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung StfV) vom 27. Februar 1991  
Stand am 28. März 2000
- [THÜR 2000]: Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur  
Risikoanalyse zum Transport gefährlicher Güter durch die Tunnelkette der BAB A71 im Bereich des Thüringer Walds  
  
Teilgutachten I: Vergleich zwischen dem Abschnitt Hochwaldtunnel und der Umfahrroute Zella-Mehlis  
2000, Ernst Basler + Partner, BUNG Ingenieure, Kündig Ingenieurbüro
- [TNO 1997] TNO: The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research  
Methods for the calculation of physical effects – Yellow book  
1997
- [TRBO 2004]: Trbojevic, V. M.; Risk Criteria in EU; 2004



## ANHANG 2 - FALLBEISPIELE

Das im Hauptbericht beschriebene Verfahren, dessen methodische Hintergründe und Herleitungen im Anhang 1 dokumentiert wurden, werden im vorliegenden Anhangbericht beispielhaft angewendet. Die Anwendung auf 13 Tunnel im Rahmen der Grobbeurteilung und 2 Tunnel der vertieften Analyse ist in den folgenden Kapiteln zusammengestellt. Die exemplarische Anwendung war insbesondere für eine Kalibrierung der Bewertungskriterien und die Prüfung der Konsistenz innerhalb des Verfahrens notwendig. Daher sind einige Ergebnisdarstellungen auch im Anhang 1 aufgeführt.

### 1 Stufe 1 – Grobbeurteilung

Im Rahmen der Grobanalyse wurden die in Tab. 18 zusammengestellten Tunnel hinsichtlich ihres intrinsischen Risikos bewertet. Die 13 Tunnel setzten sich aus 11 Richtungsverkehrstunneln und 2 Gegenverkehrstunneln zusammen. Die Charakteristik zeigt ein sehr breites Spektrum. Der Anteil

von Tunneln, der bezüglich der risikorelevanten Parameter Verkehrsbelastung, Tunnellänge, LKW-Anteil etc. für deutsche Verhältnisse überdurchschnittliche Werte haben, war hierbei hoch.

#### Stufe 1a

Die Anwendung des Kenngrößenverfahrens führt dazu, dass ausschließlich der Tunnel RV\_K alle Ausschlusskriterien erfüllt und über die Stufe 1a die Tunnelkategorie A für uneingeschränkte Gefahrguttransporte zugewiesen bekommt. Der einzige Tunnel, der ebenfalls eine Länge von weniger als 400 m aufweist (RV\_B) hat jedoch eine Längsneigung von 4,5 % und muss daher in der Stufe 1 b detaillierter untersucht werden.

Tunnelbezeichnung	RV_A	RV_B	RV_C	RV_D	RV_E	RV_F	RV_G	RV_H	RV_I	RV_J	RV_K	GV_A	GV_B
<b>Eingangsparameter</b>													
Verkehrsort	RV	RV	RV	RV	GV	GV							
Tunnellänge Richtung A [m]	1.552	345	2.291	1.067	1.724	2.750	1.056	7.878	876	1.725	365	1.052	540
Tunnellänge Richtung B [m]	1.552	345	2.275	1.082	1.724	2.750	1.056	7.916	876	1.725	365	-	-
Fahrschleifen Richtung A/B	3/3	2/3	2/2	2/3	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	2/2	1/1	1/1
Standstreifen	ja	j/n	ja	j/n	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Zu- und Abfahrten Richtung A	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Zu- und Abfahrten Richtung B	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Längsneigung Richtung A [%]	+1,25	-4,5	±0,3	-3,5	+3,2	+1,1	-0,5	±~2	+2,5	+1,37	-2,0	+0,5	-5,8/1
Längsneigung Richtung B [%]	-1,07	+4,5	±0,3	+3,5	-3,2	-1,1	+0,5	±~2	-2,5	-1,37	+2,0	-0,5	+1/5,8
effektive Querschnittsbreite [m]	16,50	13	14	14	10	10	10	10	10	10	10	10	10
DTV [10 <sup>3</sup> Fahrzeuge/d]	117	65	65	65	42	44,2	44,2	44,2	44,2	27,2	30,5	13,7	17,5
SV-Anteil [%]	14,7	20	20	20	15	15,2	15,2	15,2	15,2	16	5,9	57,5	6
zul. Geschwindigkeit [km/h]	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	50	50
Videoüberwachung	ja	ja	ja	ja	nein	nein							
Fluchtaufforderung durch Lautsp.	ja	ja	ja	ja	nein	nein							
Einsprechen in Radio	ja	ja	ja	ja	nein	nein							
Tunnelsperrung	ja	ja	ja	nein	nein	nein							
Lüftungssystem*	L	N	L	L	L	L	L	L+LAZ	L	L	N	L	L+PA
mittl. Notausgangabstand [m]	150	172,5	286	267	287	275	352	303	292	287	365	210	270
Bauweise offen/bergmännisch	o.	o.	b.	b.	b.	b.	b.	b.	b.	b.	o.	o.	b.

\* LL=mech. Längslüftung, N=natürliche Längslüftung, LAZ=Luftaustauschzentrale, PA=punktueller Rauchabsaugung

Tab. 18: Fallbeispiele Stufe 1 Zusammenstellung der Tunneldaten

### Stufe 1b

In der Stufe 1b wurden sämtliche Tunnel mit den relevanten Eingangsdaten unter Anwendung des OECD/PIARC QRAM modelliert. Als Eingangsdaten wurden die folgenden Quellen genutzt:

- Handbuch zur Anwendung des OECD/PIARC QRAM [INER 2005b]
- Tunnelparameter gem. Tab. 18
- Fehlende Daten gem. Tab. 19 bis Tab. 21 (s. u.)

Daten, die nicht tunnelspezifisch vorlagen, wurden mit Durchschnittswerten, die für deutsche Tunnel allgemein gelten, belegt. Diese Werte sind in den folgenden Tabellen aufgeführt:

Gefahrgut	Anteil
Anteil aller brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransporte) - z. B. Benzin, Diesel, etc.	0,2450
<i>davon: Anteil leicht entflammbarer brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransport) - z. B. Benzin, etc.</i>	<i>0,5000</i>
Anteil brennbarer Gase (Tanktransport) - z. B. Propan etc.	0,0280
Anteil brennbarer Gase (Flaschen) - z. B. Propan etc.	0,0090
Anteil hochgiftiger Gase, Chlortransporte in großvolumigen Tanks (20 t)	0,0002
Anteil giftiger Gase (Tanktransport) - z. B. Ammoniak, etc.	0,0110
Anteil giftiger Flüssigkeiten (Tanktransport) - z. B. Acrolein, etc.	0,0010
Anteil giftiger Flüssigkeiten (Flaschen) - z. B. Acrolein, etc.	0,0010
Anteil nicht brennbarer Druckbehälter (Flaschen) - z. B. CO <sub>2</sub> , etc.	0,0100

Tab. 19: Standard Gefahrgutverteilung für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM

Betriebsart	Einfluss von Zu-/Abfahrten	Wert für $h_{\text{Kollision}}$
Gegenverkehrstunnel	mit Einfluss	$9,81 \cdot 10^{-7}$
Gegenverkehrstunnel	ohne Einfluss	$6,81 \cdot 10^{-7}$
Richtungsverkehrstunnel	mit Einfluss	$5,28 \cdot 10^{-7}$
Richtungsverkehrstunnel	ohne Einfluss	$2,28 \cdot 10^{-7}$

Tab. 20: Eingangsparameter Unfallrate

Parameter Verkehr	Wert
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr	6 %
Busanteil am SV-Verkehr	5 %
Zeitperiode Tag (normal)	6.00-21.00 Uhr
Zeitperiode Nacht (quiet)	21.00-6.00 Uhr
Verkehrsstärke pro Stunde Tag <sup>44</sup>	1,3·DTV/24
Verkehrsstärke pro Stunde Nacht <sup>44</sup>	0,5·DTV/24
Personenbesetzungsgrad PKW	1,5
Personenbesetzungsgrad LKW	1,1
Personenbesetzungsgrad Bus	40
Korrekturfaktor Unfallrate f. GG-Transporte	1
Geschwindigkeit PKW	$v_{\text{zul}}$
Geschwindigkeit LKW	$\min(80, \text{HBS}^{45}, v_{\text{zul}})$

Tab. 21: Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM

Die Berechnung der EV-Werte für die 13 Tunnel<sup>46</sup> führte nach den Auswerteregeln gem. Hauptbericht zu den Ergebnissen, die in der folgenden Tabelle (Tab. 22) zusammengestellt sind. In der Tabelle sind die Grenzwerte gem. Anhang 1 Abschnitt 5.2.3 dargestellt.

Tunnel	OECD/PIARC-Modell				
	Gesamt	Brand (Benzin)	Druck/Brand (Propan)	Toxizität (Chlor)	Druck (CO <sub>2</sub> )
RV_A	9,5E-03	6,7E-03	1,9E-03	8,5E-04	0,0E+00
RV_B	1,1E-03	7,8E-04	1,9E-04	9,5E-05	2,1E-08
RV_C	2,3E-03	1,7E-03	4,4E-04	1,5E-04	0,0E+00
RV_D	1,5E-02	1,3E-02	2,3E-03	2,4E-04	0,0E+00
RV_E	5,4E-03	4,5E-03	8,3E-04	3,8E-06	0,0E+00
RV_F	6,2E-03	5,0E-03	1,1E-03	1,4E-05	1,9E-07
RV_G	1,3E-02	1,2E-02	1,8E-03	1,5E-05	1,3E-06
RV_H	1,1E-02	7,5E-03	3,4E-03	5,7E-04	4,8E-07
RV_I	5,7E-03	5,0E-03	7,4E-04	6,3E-06	5,7E-07
GV_A	5,7E-03	4,6E-03	7,1E-04	3,7E-04	3,9E-06
GV_B	1,7E-04	1,0E-04	1,4E-05	5,3E-05	0,0E+00
RV_J	2,5E-03	2,1E-03	3,8E-04	4,9E-06	6,0E-08
RV_K	2,2E-04	1,7E-04	4,6E-05	1,0E-05	7,8E-08
Vergleichswerte	6,2E-03	5,0E-03	1,2E-03	4,0E-04	1,0E-06

Tab. 22: Zusammenstellung der Gesamtergebnisse

Mit den ermittelten Schadenerwartungswerten sind die Tunnel RV\_A, RV\_D, RV\_G, RV\_H und GV\_A mit einer vertieften Analyse (Stufe 2a) detailliert zu

<sup>44</sup> Gültig für zwei Zeitperioden 6.00-21.00 Uhr (normal) und 21.00-6.00 Uhr (quiet). Für veränderte Zeiträume bzw. Einführung einer Spitzenstunde sind die Faktoren anzupassen.

<sup>45</sup> Bemessungsgeschwindigkeit für SV-Verkehr nach [HBS 2001] in Abhängigkeit der Neigung und Länge einer Steigungsstrecke

<sup>46</sup> Der Tunnel RV\_K, für den die Anwendung nach der Stufe 1a nicht erforderlich wäre, wurde zur Überprüfung ebenfalls berechnet.

untersuchen. Die übrigen Tunnel werden unter Beachtung sonstiger Randbedingungen, die mit dem Modell nicht abgebildet werden können, in die Kategorie A eingestuft und für sämtlichen Gefahrguttransport frei gegeben. Eine Beschilderung ist nicht erforderlich.

## 2 Stufe 2 – Vertiefende Analyse

### 2.1 Tunnel A (Gegenverkehrstunnel)

#### 2.1.1 Einleitung

Ergibt die vereinfachte Analyse gemäß der Stufe 1b des Verfahrens nicht akzeptable Risiken gemäß den Kriterien der Stufe 1b, so ist eine vertiefte Analyse der Risiken gemäß Stufe 2a zur Bestimmung der erforderlichen Tunnelkategorie vorzunehmen. Das Verfahren ist nachfolgend am Beispiel des Tunnel A beschrieben.

#### 2.1.2 Tunneldaten

Die wichtigsten Tunneldaten von Tunnel A sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tunnelparameter		
Verkehrsart		GV
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung		1
Zulässige Höchstgeschwindigkeit		50 km/h
Tunnellänge		1.052 m
Bauwerk		Off. Bw.
Querschnitt	Höhe	4,50 m
	lichte Breite	9,50 m
Längsneigung		0,5 %
Lüftungssystem		Längslüftung
Entwässerung		Schlitzrinne
Notausgangabstand		200 m
Kommunikationseinrichtungen		Notrufstationen
Besonderheiten		-
Verkehrsdaten		
DTV		13.700 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil		57,5 %
Gefahrgutanteil am SV		6 %

Tab. 23: Eckdaten Tunnel A

#### 2.1.3 Häufigkeits- und Ausmaßermittlung

##### Häufigkeitsermittlung

Die Häufigkeitsermittlung erfolgt gemäß dem im Hauptbericht beschriebenen Vorgehen. Aufgrund einer Verkehrsprognose und Angaben zum Schwerverkehrs- und Gefahrgutanteil wird die Anzahl erwarteter Fahrten pro Jahr ermittelt. Für die Gefahrgutzusammensetzung werden die ge-

samtdeutschen Mittelwerte angenommen, mit Ausnahme der Gefahrgutklasse 3, für welche aufgrund einer Analyse der ansässigen Industrie ein erhöhter Anteil zu erwarten ist.

Die Quantifizierung der Verzweigungen in den Ereignisbäumen erfolgt gemäß dem Vorgehen im Hauptbericht.

##### Ausmaßermittlung

Für die Abschätzung der Wirkungen von Gefahrgutfreisetzung werden verschiedene numerische Modelle verwendet.

Die Ausmaßermittlung für Brandszenarien basiert auf einer Studie zur Entrauchung im Brandfall. Für verschiedene Brandfälle und Verkehrssituationen wurden mittels Modellversuchen die Rauchausbreitung, die Rauchsichtung und die Temperaturänderungen untersucht. Unter Berücksichtigung des Alarmierungszeitpunktes, der vorhandenen Fluchtwege für die Selbstrettung und der Einsatzmöglichkeiten der Rettungsdienste wird die Anzahl im Tunnel anwesender Personen zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Ereignis ermittelt. Durch Überlagerung der Einwirkungen (Rauchgase und Wärme) mit der Anzahl exponierter Personen an allen Stellen des Tunnels kann die Anzahl erwarteter Todesopfer ermittelt werden.

Für den Leitstoff Propan wird zwischen den Schadenwirkungsarten Feuerball/BLEVE, Freistrahbrand und Gaswolkenbrand unterschieden. Die Abschätzung des Schadenausmaßes erfolgt anhand [RBFT 1992], [BUWAL 1996] und [TNO 1997]. Die Druckwirkungen werden aufgrund von Modellen für den Leitstoff TNT abgeleitet.

Die Ausbreitung des Leitstoffes Chlor bei einem Unfall eines Gefahrguttransportes kann anhand der Modelle gemäß [TNO 1997] ermittelt werden. Die Modelle ermöglichen sowohl eine Ermittlung der Ausbreitungsdistanzen als auch der zugehörigen Letalitäten für exponierte Personen.

Für die Abschätzung der Druckwirkungen von Explosionen von Feststoffen (Leitstoff TNT) werden Modelle nach [TLM 1975] verwendet.

Da sich der Tunnel in stark besiedeltem städtischem Gebiet befindet, können bei Gefahrgutereignissen innerhalb des Tunnels auch Personen in den Portalzonen betroffen sein. Dies wird berücksichtigt, indem die Schadenausmaße für Szenarien, deren Wirkbereiche über die Portalzonen hinausgehen, entsprechend erhöht werden. Für die Szenarien der Schwergasausbreitung wird dieser Effekt nicht berücksichtigt, da der Tunnel abge-

senkt ist und sich die Ausbreitung auf den Tunnel selbst beschränkt.

Der Tunnel wurde in Tagbauweise erstellt. Für Explosionswirkungen musste deshalb geprüft werden, ob durch ein Versagen der Tunnelkonstruktion und damit zusätzlichen Todesopfern auf der Oberfläche gerechnet werden muss. Für Brandwirkungen ist dieser Aspekt aufgrund der großen Zeitspanne zwischen Ereignis und einem möglichen Deckeneinsturz und somit entsprechend großem Selbst- und Fremdretragsanteil nicht relevant.

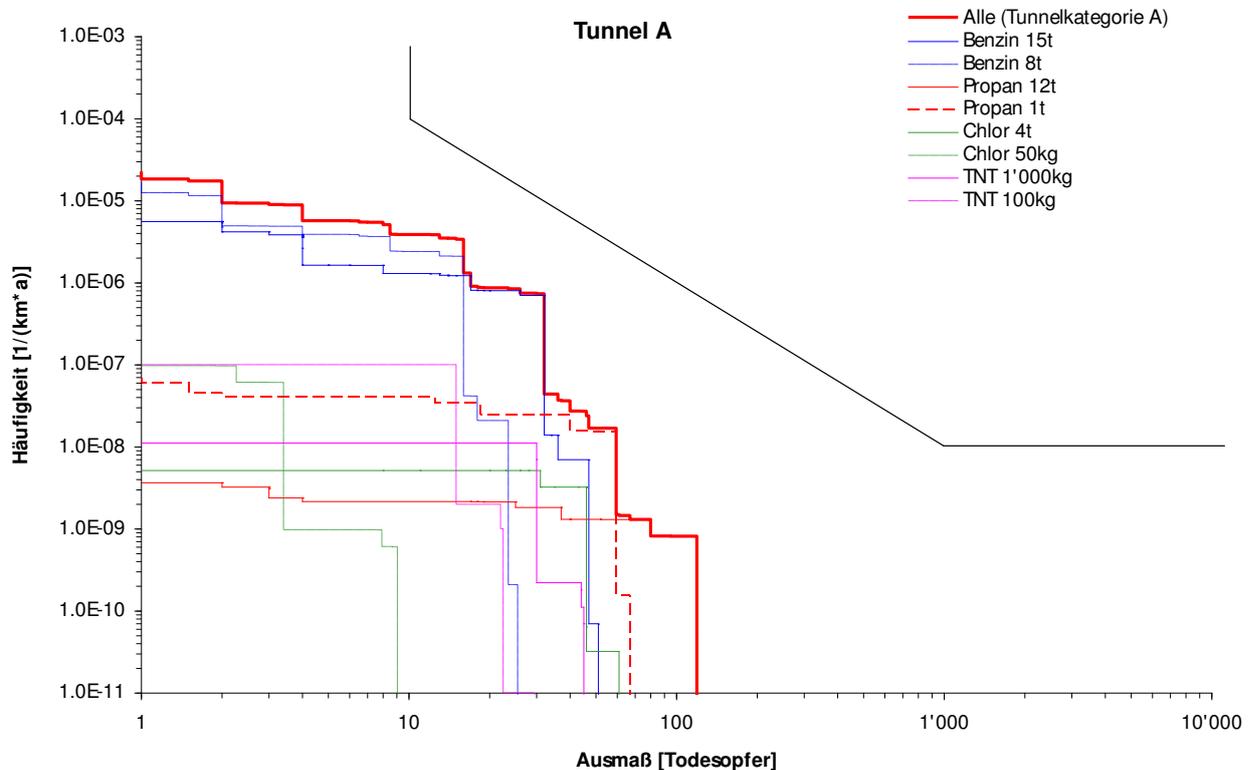
### 2.1.4 Ergebnisse

In Bild 28 sind die Ergebnisse der Risikoanalyse für die acht untersuchten Szenarien der vier Leitstoffe dargestellt. Dabei werden die kollektiven Risiken, normiert auf eine Länge von einem Kilometer, als Summenkurven im H-A-Diagramm ausgewiesen. Ebenfalls dargestellt sind die über alle Szenarien und Leitstoffe aufsummierte Gesamtsummenkurve sowie das Vergleichskriterium.

Der Bereich der kleinen bis mittleren Schadenausmaße im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm wird vom Leitstoff Benzin dominiert. Im Bereich der mittleren und großen Schadenausmaße sind die Propan-szenarien maßgebend.

Die über alle Szenarien aufsummierten Gesamtrisiken für den Tunnel A liegen deutlich unter der Vergleichslinie. Es ist somit keine Beschränkung für Gefahrguttransport erforderlich und der Tunnel kann der Tunnelkategorie A zugeteilt werden. Es ist keine Beschilderung anzubringen.

Es sind keine weiteren Untersuchungen nötig und das Verfahren ist damit abgeschlossen.



**Bild 28:** Tunnel A, Summenkurven aller Leitstoffe und Szenarien (Tunnelkategorie A)

## 2.2 Tunnel B (Richtungsverkehrstunnel BAB)

### 2.2.1 Einleitung

Ergibt die vereinfachte Analyse gemäß der Stufe 1b des Verfahrens nicht akzeptable Risiken gemäß den Kriterien der Stufe 1b, so ist eine vertiefte Analyse der Risiken gemäß Stufe 2a zur Bestimmung der erforderlichen Tunnelkategorie vorzunehmen. Das Verfahren ist nachfolgend am Beispiel des Tunnel B beschrieben.

### 2.2.2 Tunneldaten

Die wichtigsten Tunneldaten von Tunnel B sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tunnelparameter	
Verkehrsart	Richtungsverkehr
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung	3
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
Tunnellänge	1.552 m
Bauwerk	Stahlbetonwände, im Dachbereich Stahlbetonfertigteile mit Glaselementen
Querschnitt	16,50 m (Fahrspuren, Standstreifen, Notgehwege)
Längsneigung	var. -0.40 % bis 1,25 %
Lüftungssystem	Längslüftung mit Rauchabzugsklappen
Entwässerung	Schlitzrinnen
Fluchtwege	Fluchttreppenhäuser alle 300 m, Türen in gegenüberliegende Röhre alle 150 m
Kommunikationseinrichtungen	Notrufstationen, Verkehrsfunk, Lautsprecher
Überwachungseinrichtungen	Videoüberwachung, Brandmeldeanlage
Besonderheiten	Zu-/Abfahrt in beiden Fahrtrichtungen
Verkehrsdaten	
DTV	117.000 Kfz/Tag
Schwerverkehrsanteil	14,7 %
Gefahrgutanteil am SV	6 %

Tab. 24: Eckdaten Tunnel B

### 2.2.3 Häufigkeits- und Ausmaßermittlung

#### Häufigkeitsermittlung

Die Häufigkeitsermittlung erfolgt gemäß dem im Hauptbericht beschriebenen Vorgehen. Aufgrund von aktuellen, auf Verkehrszählungen basierenden Angaben zum Verkehrsaufkommen und zum Schwerverkehrs- und Gefahrgutanteil wird die Anzahl erwarteter Fahrten pro Jahr ermittelt. Die Gefahrgutzusammensetzung basiert auf einer Analyse ortsansässigen Produzenten und Verbraucher.

Für die Unfallrate wird aufgrund der beidseitig im Tunnel vorhandenen Auf- und Abfahrten ein gegenüber dem gesamtdeutschen Durchschnitt leicht erhöhter Wert zugrunde gelegt.

Die Quantifizierung der Verzweigungen in den Ereignisbäumen erfolgt gemäß dem Vorgehen im Hauptbericht.

#### Ausmaßermittlung

Für die Abschätzung der Wirkungen von Gefahrgutfreisetzung werden verschiedene numerische Modelle verwendet. Besonderer Beachtung bedarf bei der Ermittlung der Auswirkungen die Bauweise des Tunnels. Der im Tagbau erstellte Tunnel besteht aus Stahlbetonwänden und einem auf einer Struktur aus Stahlbetonfertigteilen gelagerten Glasdach.

Die Ausmaßermittlung für Brandszenarien basiert auf Brandgasausbreitungsberechnungen, bei denen in Abhängigkeit der Temperaturentwicklung eine eventuelle Zerstörung der Glasabdeckung, und damit gleichzeitig eine maßgebliche Vergrößerung der Öffnung für den Rauchabzug, berücksichtigt wurden. Die Untersuchungen wurden für verschiedene Verkehrssituationen, d. h. für unterschiedliche Strömungsverhältnisse im Tunnel, durchgeführt. Aus dem resultierenden örtlichen und zeitlichen Verlauf der Rauchgasausbreitung wird, unter Berücksichtigung des Alarmierungszeitpunktes der Tunnelnutzer, der vorhandenen Fluchtwege für die Selbstrettung und der Einsatzmöglichkeiten der Rettungsdienste, die Anzahl erwarteter Todesopfer ermittelt. Es wird ebenfalls untersucht, ob durch den möglichen Deckeneinsturz zusätzliche Todesopfer zu erwarten sind.

Für Ereignisse mit Druckwirkungen, d. h. für die Leitstoffe Propan und TNT, wird der Zeitpunkt und die Ausdehnung des Versagens der Dachkonstruktion für die verschiedenen Szenarien untersucht. Nach einem Versagen der Konstruktion können sich Überdrücke ungehindert ausbreiten und der Verdämmungseffekt wird abgebaut. Die Auswir-

kungen bei Versagen des Glasdachs infolge Splitter- und Trümmerwurf und infolge Einsturz der Betonelemente und die dadurch zu erwartende Anzahl Todesopfer innerhalb (Verkehrsteilnehmer) und außerhalb (Anwohner) des Tunnels werden abgeschätzt.

#### 2.2.4 Ergebnisse

Bild 29 (Seite 8) zeigt die für die acht untersuchten Szenarien resultierenden Risiken. Die Gesamtsummenkurve entspricht den Risiken, welche sich bei uneingeschränktem Gefahrguttransport ergeben (Tunnelkategorie A).

Die Risiken werden im Bereich der kleinen und mittleren Schadenausmaße durch die vergleichsweise häufig vorkommenden Benzinszenarien dominiert. Im Bereich der sehr seltenen Ereignisse mit großem Schadenausmaß ist das Szenario einer Freisetzung von großen Mengen toxischer Stoffe maßgebend.

Die Gesamtrisiken liegen über der Vergleichslinie. Somit ist eine Beschränkung für Gefahrguttransport erforderlich.

Gemäß dem im Leitfaden beschriebenen Vorgehen wird die vorzusehende Tunnelkategorie ermittelt, indem schrittweise die in der jeweiligen Kategorie nicht zugelassenen Transporte in der Risikoeermittlung nicht mehr berücksichtigt werden.

In der Tunnelkategorie B sind keine Transporte erlaubt, welchen im Ereignisfall zu sehr großen Explosionen führen können. Somit sind die Szenarien 3 und 7 nicht mehr zu berücksichtigen. Mit den verbleibenden Szenarien ergeben sich die in Bild 30 (Seite 8) dargestellten Risiken. Diese liegen weiterhin im nicht akzeptablen Bereich.

Bei der Tunnelkategorie C werden neben den Beschränkungen der Kategorie B zusätzlich diejenigen Güter verboten, welche zur Freisetzung toxischer Stoffe (Szenario 5) oder zu großen Explosionen (Szenario 8) führen können. Es resultieren die Risiken gemäß Bild 31 (Seite 9). Das maximal mögliche Ausmaß wird zwar erheblich reduziert, jedoch liegen die Gesamtrisiken nach wie vor im nicht akzeptablen Bereich.

Bei der Kategorie D wird zusätzlich der Transport von Gütern beschränkt, welche zu großen Bränden führen können (Szenarien 1 und 4). Die verbleibenden Risiken werden durch die Szenarien 2 und 6 abgebildet und liegen, wie in Bild 32 (Seite 9) ersichtlich, im akzeptablen Bereich.

Dem Tunnel ist somit die Tunnelkategorie D zuzuweisen.

Die im Tunnel beschränkten Gefahrguttransporte sind auf eine geeignete Umfahrroute umzuleiten. Für diese ist die Tragbarkeit der zusätzlichen Risikoerhöhung nachzuweisen.

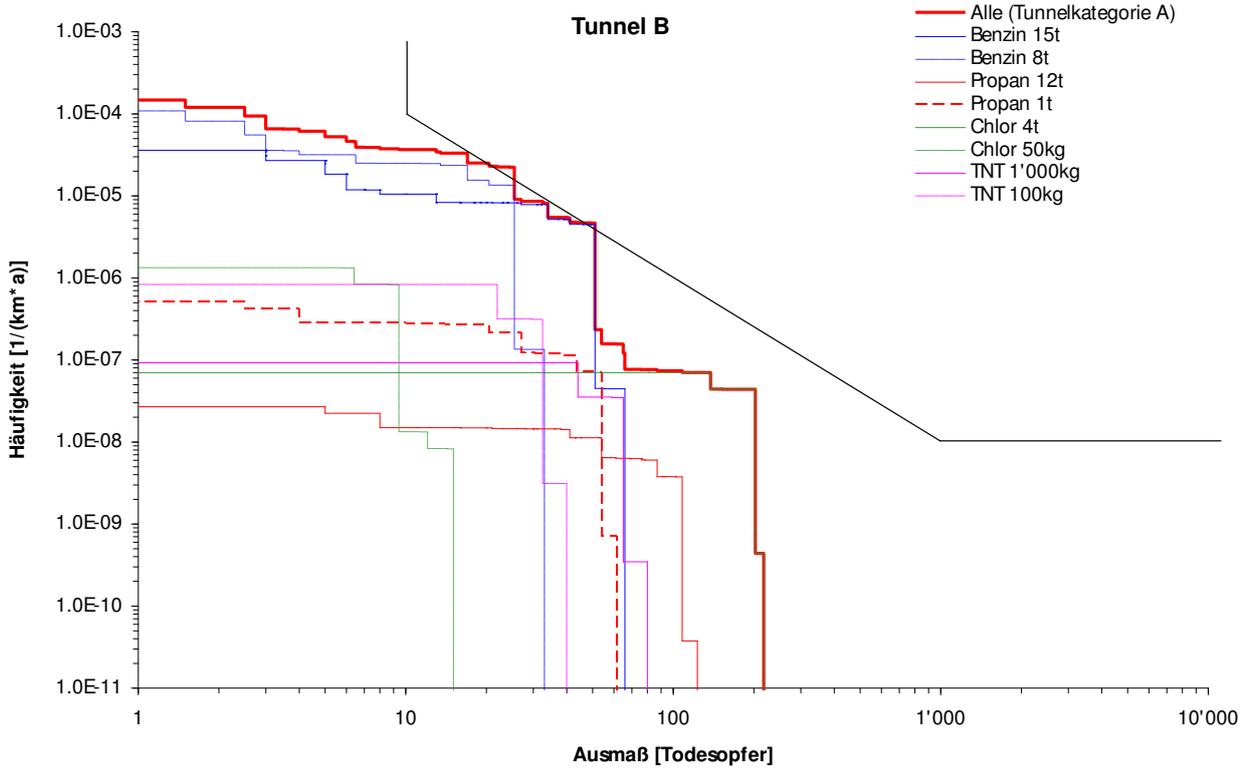


Bild 29: Tunnel B, Summenkurven aller Leitstoffe und Szenarien (Tunnelkategorie A)

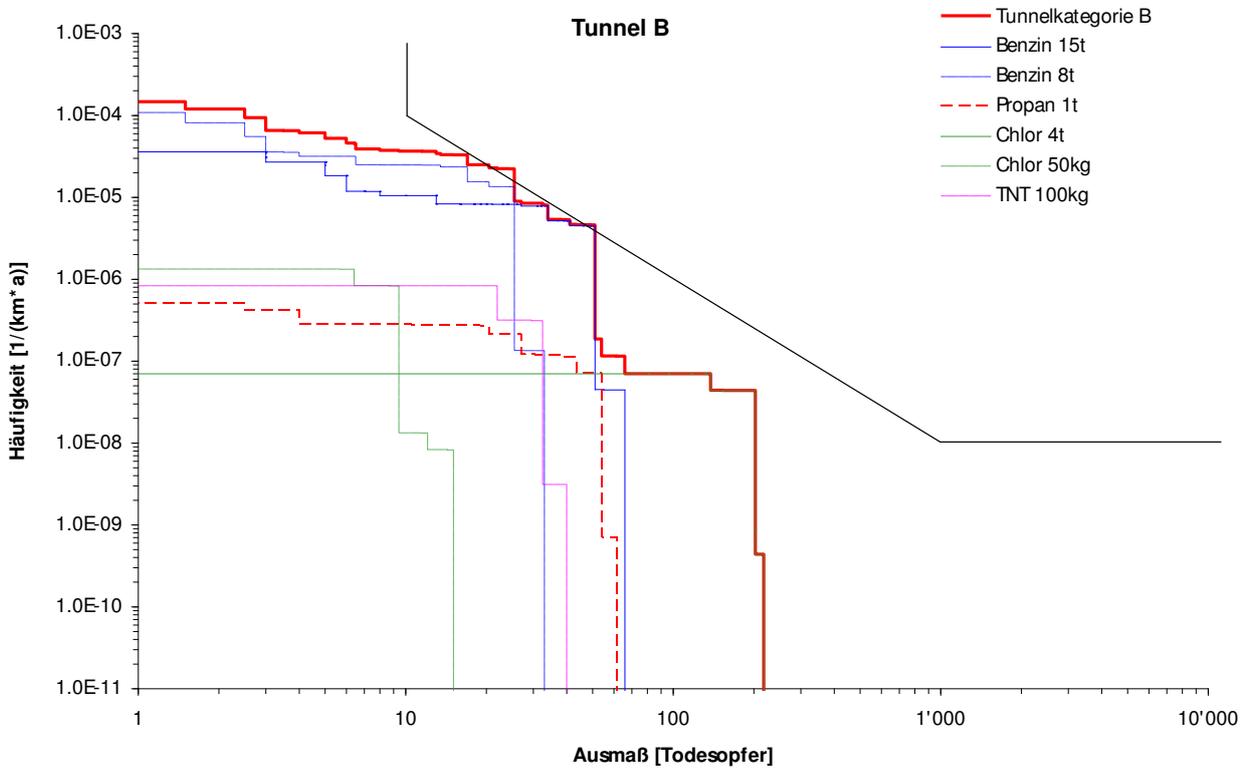


Bild 30: Tunnel B, Summenkurven für Tunnelkategorie B

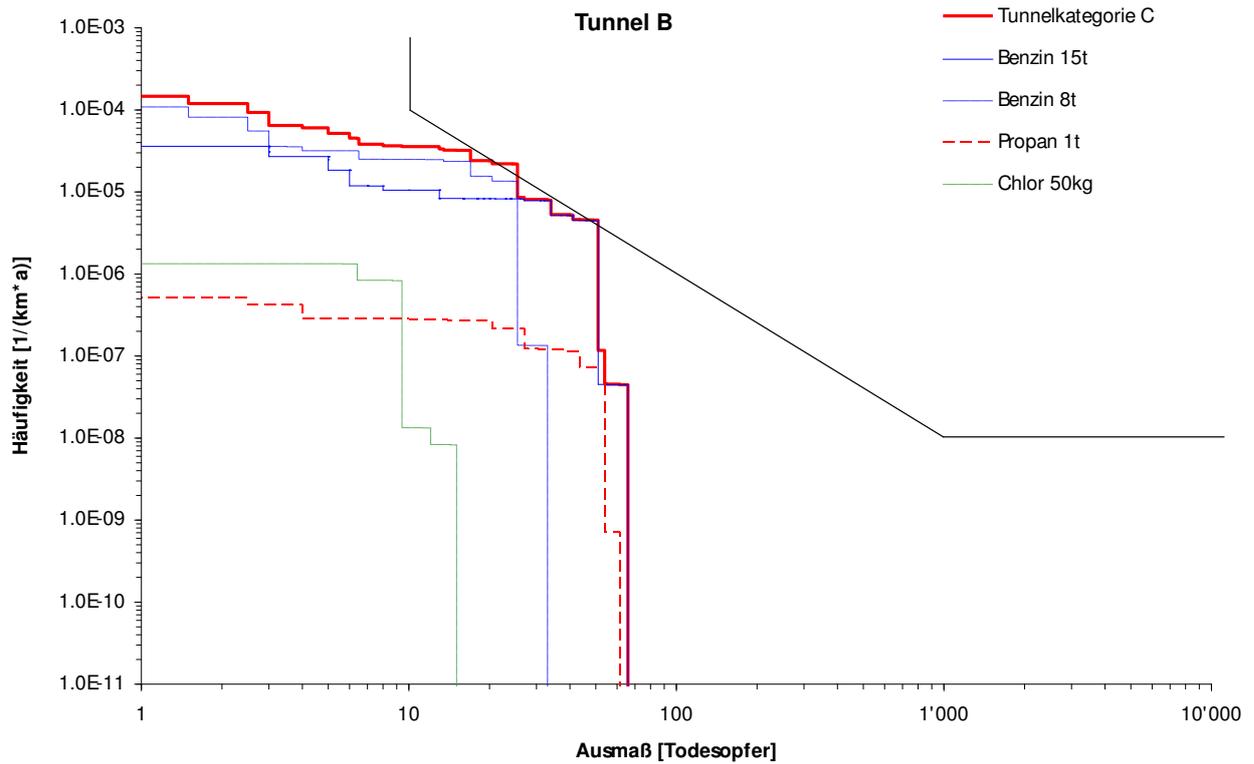


Bild 31: Tunnel B, Summenkurven für Tunnelkategorie C

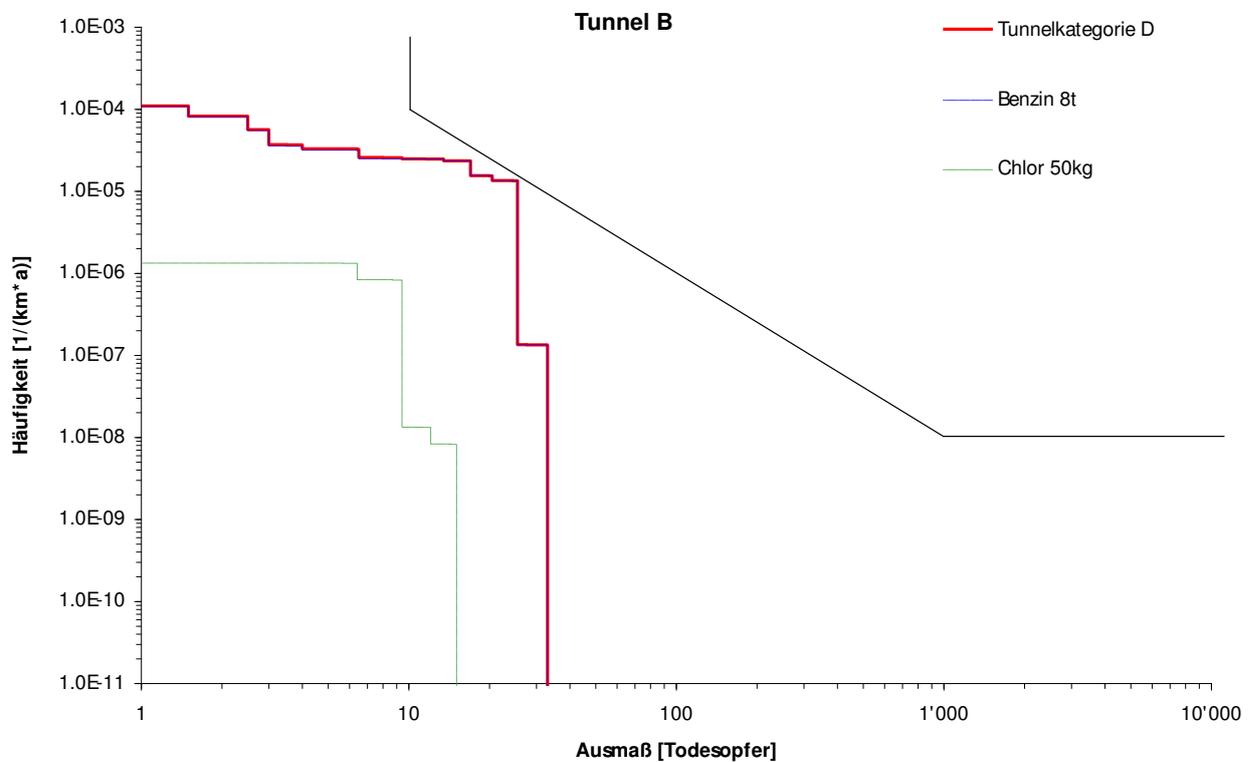


Bild 32: Tunnel B, Summenkurven für Tunnelkategorie D

### 2.2.5 Gefahrgutrisiken auf der Umfahrungsstrecke

Aufgrund der Beschränkung der Gefahrguttransporte durch den Tunnel B (Zuordnung zur Kategorie D gemäß ADR) werden die den Szenarien 1, 3, 4, 5, 7 und 8 zugeordneten Gefahrgüter über eine Umfahrungsstrecke geleitet.

Nachfolgend ist das Vorgehen zur Ermittlung der Risiken für die Umfahrungsstrecke beschrieben.

#### Charakterisierung der Umfahrungsstrecke

Aufgrund einer Vorgabe der zuständigen Behörden wird eine aus Blickwinkel der Verkehrsführung geeignete Umfahrungsstrecke festgelegt. Die Umfahrungsstrecke berücksichtigt, dass verschiedene Anfahrts- bzw. Abfahrtswege zum bzw. vom Tunnel bestehen (Berücksichtigung verschiedener Zu-/Abfahrtswege).

Die Umfahrungsstrecke liegt teilweise in einem verhältnismäßig dicht besiedelten städtischen Gebiet / Agglomerationsgebiet und führt sowohl über Autobahnstrecken als auch über Landstraßen. Einzelne Abschnitte führen durch relativ schwach besiedelte (Außerorts-)Bereiche. Für die Zwecke der Untersuchung wurde die Umfahrungsstrecke in insgesamt rund 30 Untersuchungseinheiten unterteilt.

Aus Blickwinkel der Risiken sind insbesondere diejenigen Streckenabschnitte maßgebend, welche eine erhöhte Personenexposition aufweisen und die erwartete Freisetzungshäufigkeit erhöht ist. Exemplarisch ist nachfolgend das Vorgehen zur Ermittlung und Bewertung der Risiken für einen Streckenabschnitt zusammengefasst. Der dargestellte Streckenabschnitt wird durch folgende Einflussgrößen charakterisiert:

- Der untersuchte Streckenabschnitt liegt in einem vergleichsweise dicht besiedelten Wohngebiet.
- Personenexposition
  - Links und rechts des untersuchten Streckenabschnitts wird jeweils eine homogene Bevölkerungsdichte innerhalb der relevanten Wirkungsbereiche angenommen.
  - Die Wohnbevölkerungsdichte liegt bei rund 7.000 Personen pro km<sup>2</sup>.
  - Die Arbeitsbevölkerungsdichte liegt bei rund 500 Personen pro km<sup>2</sup>. Es wird davon ausgegangen, dass während der Nacht nur 10 % der Arbeitsbevölkerung exponiert ist.
  - Es wird angenommen, dass sich während des Tages 90 % der Personen in Gebäuden befinden. Während der Nacht wird von einem Wert von 99 % ausgegangen.
  - Die Temperatur und atmosphärische Schichtung beeinflusst das Ausbreitungsverhalten von Gasen. Für die Modellierung der untersuchten Strecken wird von einer mittleren Temperatur von 15°C ausgegangen. Die atmosphärischen Bedingungen werden mit zwei Wetterlagen berücksichtigt:
    - Windstille bzw. Schwachwind (atmosphärische Stabilitätsklasse F)
    - Wind von 4 m/s (atmosphärische Stabilitätsklasse D)
- Für das ortsspezifische Gefahrgutaufkommen wird von analogen Werten ausgegangen wie für den Tunnel.

#### Häufigkeitsermittlung

Für die Abschätzung der Ereignishäufigkeit wird die ermittelte Zahl der Gefahrguttransporte entsprechend der Beschränkung für den Tunnel B erhöht: Erhöhung der Transportzahlen für die Szenarien 1, 3, 4, 5, 7 und 8. Für die beiden Szenarien 2 und 6 werden die Risiken der bereits auf dem Untersuchungsabschnitt vorliegenden Gefahrguttransporte berücksichtigt.

Die Ermittlung der ortsspezifischen Unfallraten bzw. Raten von Unfällen mit Freisetzung und die Quantifizierung der Verzweigungen in den Ereignisbäumen erfolgt gemäß dem Vorgehen im Hauptbericht.

### Ausmaßermittlung

Die leitstoffspezifische Ausmaßermittlung erfolgt anhand von Modellen, welche im Hauptbericht bzw. im Kapitel 6.2 von Anhang 1 aufgeführt sind:

- Leitstoff Benzin: Die Ermittlung der Lachenflächen und der Wirkung der Hitzestrahlung erfolgt mittels einer Abschätzung auf Basis von [CARB 1992]. Die Wirkungen der sich entwickelnden Rauchgase sind auf offener Strecke von untergeordneter Bedeutung und werden nicht dementsprechend nicht berücksichtigt.
- Leitstoff Propan: Bei einer verzögerten Zündung könne sich die freigesetzten Gase relativ ungehindert ausbreiten. Die ausbreitungsvermindernde Wirkung der Gebäude wird pragmatisch über Skalierungsfaktoren berücksichtigt. Zur Ermittlung des Schadenausmaßes wird das Vorgehen gemäß [RBFT 1992] und [BUWAL 1996] gewählt.
- Leitstoff Chlor: Hinsichtlich der Gasausbreitung gelten dieselben Überlegungen wie für den Leitstoff Propan (bei verzögerter Zündung). Zur Ermittlung der Wirkdistanzen und Schadenausmaße wird eine spezielle Software, welche auf [TNO 1997] basiert eingesetzt. Diese geht vereinfachend von einer Gasausbreitung in der Ebene aus. Die Wirkung der Gebäude wird über die Erhöhung der Bodenrauigkeit im Modell berücksichtigt.
- Leitstoff TNT: Die Ausmaßermittlung basiert auf einer Abschätzung basierend auf [TLM 1975] und [LS 2000]. Hierbei ist insbesondere die ausmaßmindernde Wirkung der Gebäudehüllen zu berücksichtigen.

### Ergebnisse

Bild 33 zeigt die resultierenden Summenkurven für den untersuchten Streckenabschnitt. Aufgrund des Verlaufs der resultierenden Summenkurven zeigt sich, dass im Zuge der Bewertung mittels der vorgeschlagenen Bewertungskriterien die Umfahrungsstrecke aus Blickwinkel der Risiken als geeignet bewertet werden kann.

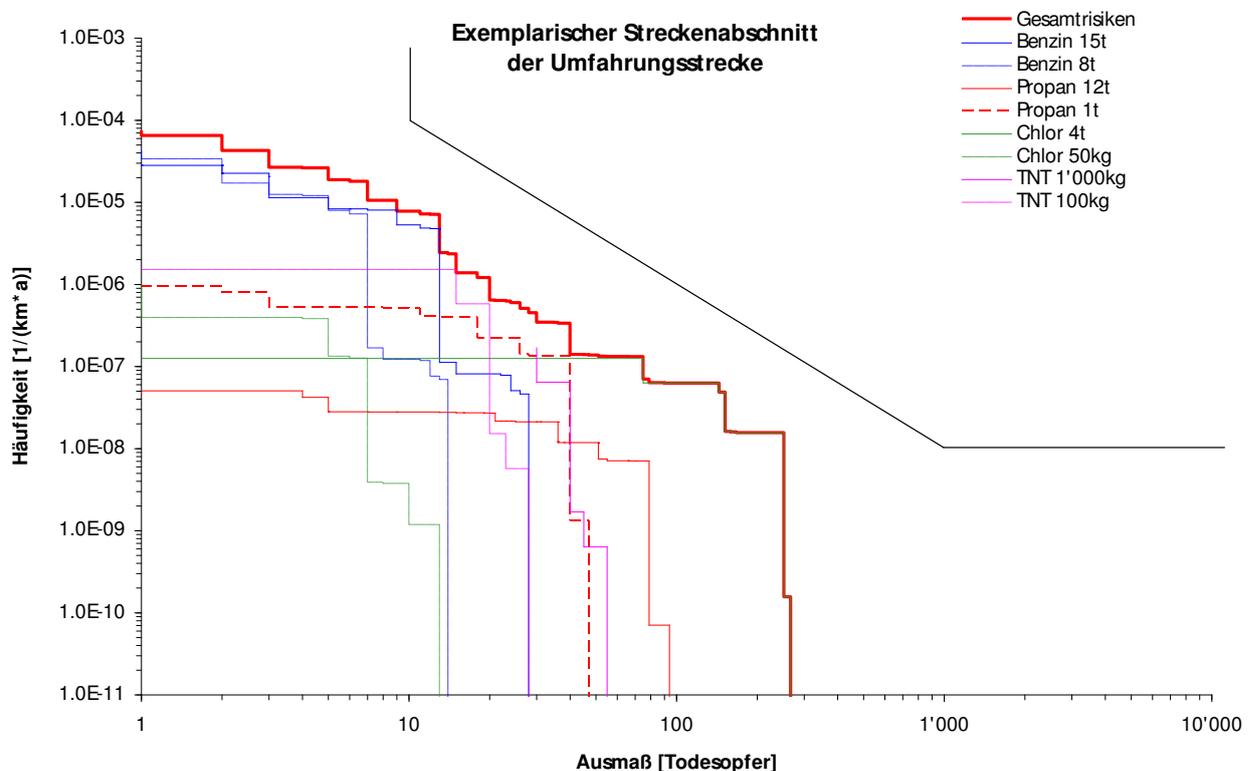


Bild 33: Summenkurven für den untersuchten Streckenabschnitt unter Berücksichtigung der zusätzlichen Gefahrguttransporte

## Literaturverzeichnis

[BUWAL 1996]: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL); Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage; Störfallverordnung. Stand: Mai 1996

[CARB 1992]: Rahmenbericht über Stehtankanlagen für flüssige Brenn- und Treibstoffe im Hinblick auf die Störfallvorsorge, SKS Ingenieure AG, Zürich 1992

[LS 2000] Anet, B.; Binggeli, E.(unter Mitarbeit von Ernst Basler + Partner AG)  
Luftstossphänomene infolge nuklearer und konventioneller Explosionen  
Gruppe Rüstung, AC-Laboratorium Spiez  
Januar 1998

[RBFT 1992]: Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen; Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge; Basler & Hofmann, Zürich, 1992

[TLM 1975]: Schweizerische Armee; Technische Vorschriften für die Lagerung von Munition (TLM 75), Teil 2 – Sicherheitsbeurteilung von Munitionslagern; März 1991, Nicht öffentlich

[TNO 1997]: TNO: The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research  
Methods for the calculation of physical effects – Yellow book  
1997

### ANHANG 3 - ANWENDUNGSHILFE OECD/PIARC QRA MODELL

Ergänzend zum ausführlichen Anwenderhandbuch zeigen die folgenden Abbildung (Bild 34 bis Bild 41) in Auszügen beispielhaft Eingabemasken des OECD/PIARC QRA Modells. Die dargestellten Daten entsprechen dem Fallbeispiel RV\_F (s. Anhang 2, Tab. 18)

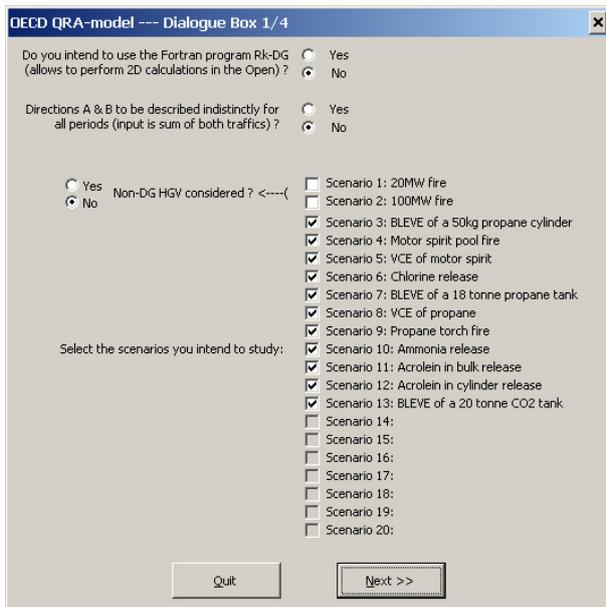


Bild 34: Eingabe Szenarienauswahl

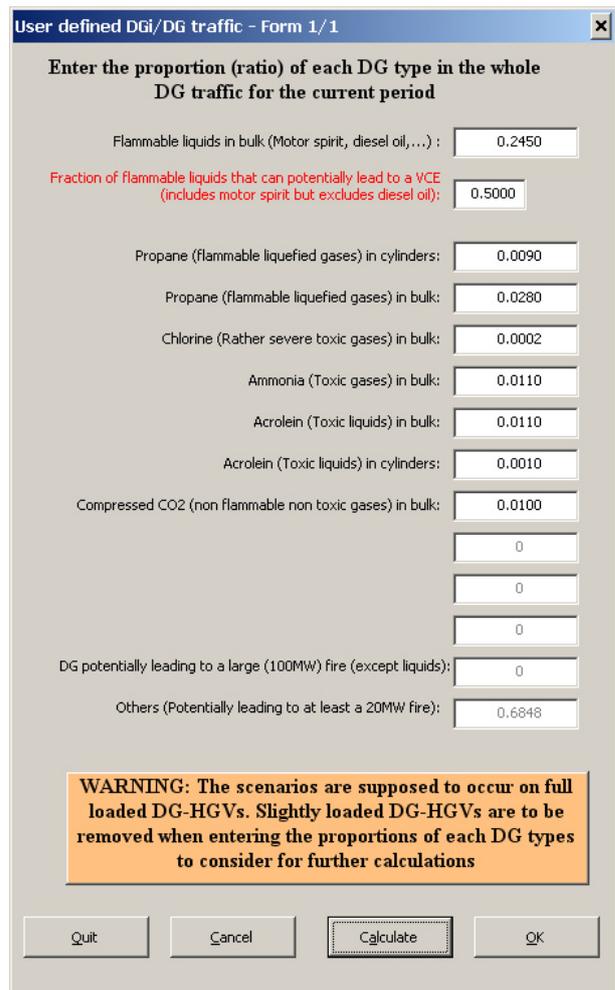


Bild 36: Eingabe Gefahrgutzusammensetzung gemäß Anhang 1, Tab. 3

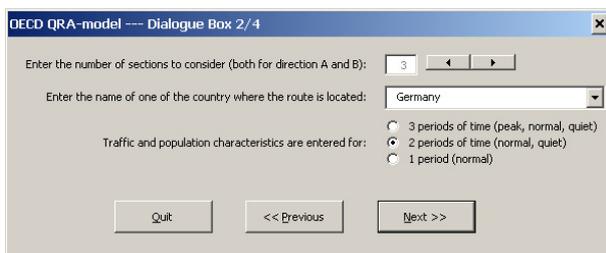


Bild 35: Eingabe RV-Tunnel mit 2 Zeitperioden (Beispiel)

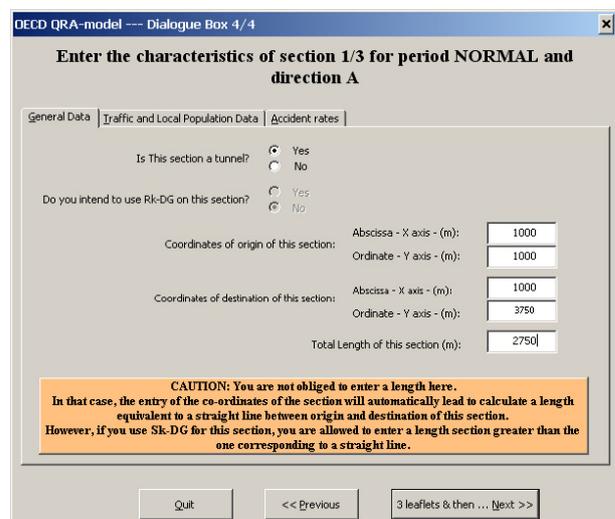


Bild 37: Eingabe Tunneldefinition und Länge

Bild 38: Eingabe Verkehrsdaten für die Zeitperiode „normal“ (Beispiel)

Bild 39: Eingabe zur Definition einer benutzerdefinierten Unfallrate

Bild 40: Eingabe Unfallrate (Beispiel)

Tunnel 1 inputs	symbol	units	data	
<b>cross-section geometry</b>				
effective width	W	m	10	
effective height	H	m	6	
open cross-sectional area	A	m <sup>2</sup>	60	
camber	Cam	%	2.5	
<b>lengthwise geometry</b>				
...segments (homogeneous - ventilation, gradient)				
total number of segments	Ns	-	1	
segment number			1	
segment lengths	Xs	m	2750	
total length of tunnel	Xt	m	2750	
segment gradient	Gs	%	1.1	
...nodes (segment start and end points)				
total number of nodes	Nn	-	2	
node number			1	2
location of node	Xn	m	0	2750
<b>ventilation - normal</b>				
...segments				
segment number			1	
volume flow rate extracted from tunnel	VsN	m <sup>3</sup> /s	0	
...nodes (segment start and end points)				
node number			1	2
volume flow rate along tunnel at nodes	VnN	m <sup>3</sup> /s	183	183

Bild 41: Eingabe von charakteristischen Tunneldaten und Lüftungsparametern für Normalbetrieb der Röhre 1 (Beispiel)