

# 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  
Oktober 2009



## Kurzfassung

Mit der Fortschreibung des europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) von 2007 wurden Tunnelbeschränkungs-codes für Gefahrgüter eingeführt. Hierdurch wurde die Grundlage für eine europaweit einheitliche Regelung im Falle einer Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel geschaffen.

Unter Berücksichtigung der EG-Tunnelrichtlinie und den RABT 2006 wurde für Deutschland ein Verfahren entwickelt, mit dem die Gefahrgutrisiken für alle Straßentunnel auf Basis von Risikoanalysen einheitlich bewertet und Einschränkungen für den Gefahrguttransport durch definierte Tunnelkategorien kenntlich gemacht werden können.

Das entwickelte Verfahren zur risikobasierten Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007 ist zweistufig aufgebaut. In einer Grob-beurteilung (Stufe 1) wird in zwei Schritten ein Tunnel dahingehend überprüft, ob dieser für sämtliche Gefahrguttransporte freigegeben werden kann.

Werden die Gefahrgutrisiken mit den einfachen Modellen der Stufe 1 als zu hoch bewertet, muss der Tunnel vertieft untersucht werden. Bei dieser vertieften Analyse (Stufe 2a) wird zunächst das intrinsische Risiko des Tunnels mit detaillierten Modellen und verfeinerten Eingangsdaten bestimmt. Liegt das ermittelte Risiko unterhalb einer auf Erfahrungswerten beruhenden Vergleichskurve, kann der Tunnel für sämtliche Gefahrguttransporte freigegeben werden. Liegt die Risikokurve oberhalb der Vergleichskurve, wird der Tunnel nach Bedarf kategorisiert, d. h. er wird für Transporte von Gefahrgütern mit gleichem Tunnelbeschränkungscode gesperrt bzw. es werden bauliche, technische oder organisatorische Maßnahmen getroffen um das Risiko zu reduzieren.

Im Falle einer Beschränkung sind die betroffenen zu transportierenden Güter über eine Umfahungsstrecke zu leiten. Für die Umfahungsstrecke ist in der Stufe 2b nachzuweisen, dass sie die aus der Umlegung resultierenden zusätzlichen Gefahrgutrisiken aufnehmen kann.

Für die einzelnen Stufen bzw. Schritte wurden die Randbedingungen hergeleitet und definiert. Anforderungen an Modelle, Daten und Anwendung sind im Bericht mit Anhang so beschrieben, dass eine einheitliche Umsetzung möglich ist. Das entwickelte Verfahren ist als Hilfsmittel für die Kategorisierung anzuwenden.

Die in der Methodik festgelegten Grenzwerte bzw. Vergleichskurven zur Beurteilung des Handlungsbedarfs wurden auf Grundlage der existierenden vergleichsweise geringen Datenbasis hergeleitet und festgelegt. Es wird empfohlen, die aus der Anwendung gewonnenen Erfahrungen für eine Fortschreibung des Verfahrens nach der Einführungsphase und ggf. nach weiteren 5 bis 8 Jahren zu nutzen.

## Abstract

With the update of the European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) dated 2007 tunnel restriction codes for hazardous goods have been established. This provided the basis for a standardised Europe-wide regulation in case of a restriction of hazardous goods transportation through road tunnels.

Taking into consideration the DIRECTIVE 2004/54/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT and RABT 2006 a procedure for Germany has been developed that evaluates standardised the hazardous goods risks for all road tunnels on basis of risk analyses and which can identify restrictions for hazardous goods transports by defined tunnel categories .

The developed procedure for a risk-based classification of road tunnels in categories according to ADR 2007 consists of two stages. In a rough evaluation (stage 1) a tunnel will be checked in two steps whether it can be released for all hazardous goods transports or not.

When the hazardous goods risks are evaluated as being too high by means of the simple models of stage 1, the tunnel has to be examined in-depth. In this in-depth analysis (stage 2a) the tunnel's intrinsic risk will be determined first of all by means of detailed models and refined input data. If the determined risk is below a comparative curve based on empirical values, the tunnel can be released for all hazardous goods transports. If the risk curve is above the comparative curve, the tunnel will be classified according to requirements, i. e. it will be blocked for hazardous goods transports with equal tunnel restriction code and constructional, technical or organisational measures will be taken respectively to reduce the risk.

In case of a restriction the affected goods to be transported have to be directed along a bypass. For the bypass it has to be proven in stage 2b that it can take the additional hazardous goods risks resulting from the rerouting.

The boundary conditions for the single stages and steps respectively have been deduced and defined. Models, data and application requirements have been specified in the report with annex in a way that provides for a uniform implementation. The developed procedure must be used as an aid for the classification in categories.

The limit values defined in the methodology and comparative curves respectively to evaluate the need for action have been derived and determined

on basis of the existing and comparatively rather small database. It is recommended to update the procedure with the experience gained from the applications after the introduction stage and after another 5 to 8 years if necessary.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		
	<b>7</b>	<b>Ausblick und Entwicklung</b>
		<b>26</b>
	<b>8</b>	<b>Fazit und Zusammenfassung</b>
		<b>27</b>
<b>1 Einleitung und Ausgangslage</b>	<b>1</b>	
<b>2 Zielsetzung und Abgrenzung</b>	<b>1</b>	
2.1 Forschungsziel	1	
2.2 Abgrenzung	1	
<b>3 Methodik von Gefahrgutrisikoanalysen</b>	<b>1</b>	
3.1 Grundlagen	1	
3.1.1 Normative Grundlagen	1	
3.1.2 Generelle Methodik zur Risikoabschätzung	3	
3.1.3 Methodik für Gefahrgutrisikoanalysen in Straßentunneln	5	
<b>4 Übersicht zum Verfahren</b>	<b>6</b>	
4.1 Struktur	6	
4.2 Anwendungsgrundsätze	7	
<b>5 Stufe 1 – Grobbeurteilung</b>	<b>7</b>	
5.1 Übersicht	7	
5.2 Stufe 1a - Kenngrößenverfahren	7	
5.3 Stufe 1b - OECD/PIARC QRAM	9	
5.3.1 Hinweise zum Programm	9	
5.3.2 Szenarien	9	
5.3.3 Eingangsdaten	10	
5.3.4 Bewertungskriterium	12	
<b>6 Stufe 2 – Vertiefte Analyse</b>	<b>12</b>	
6.1 Übersicht	13	
6.2 Leitstoffe und Szenarien	14	
6.2.1 Festlegung der Leitstoffe	14	
6.2.2 Festlegung der Szenarien	15	
6.2.3 Abschätzung der Häufigkeit von Freisetzungen	16	
6.3 Stufe 2a - Tunnel	17	
6.3.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung im Tunnel	18	
6.3.2 Ausmaßermittlung im Tunnel	20	
6.3.3 Risikoermittlung	21	
6.3.4 Risikobewertung und Kategorisierung nach ADR	21	
6.4 Stufe 2b - Umfahungsstrecke	22	
6.4.1 Übersicht	22	
6.4.2 Charakteristik der Umfahungsstrecke	22	
6.4.3 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung Freifeld	22	
6.4.4 Ausmaßermittlung Freifeld	24	
6.4.5 Risikoermittlung	25	
6.4.6 Risikobewertung	25	



## 1 Einleitung und Ausgangslage

Mit der Fortschreibung des europäischen Übereinkommens über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR<sup>1</sup>) von 2007 wurden Tunnelbeschränkungs-codes für Gefahrgüter eingeführt. Hierdurch wurde die Grundlage für eine europaweit einheitliche Regelung im Falle einer Beschränkung von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel geschaffen.

Die Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln [RABT 2006] sowie die Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im trans-europäischen Straßennetz [EG 2004], nachstehend EG-Tunnelrichtlinie genannt, sehen eine Risikobetrachtung von Gefahrguttransporten durch Tunnel vor. Dies betrifft nach der nationalen Richtlinie alle Tunnel mit einer Länge über 400 m.

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.

Terminlich ist im Rahmen der Umsetzung der EG-Tunnelrichtlinie bzw. der RABT 2006 eine Untersuchung zur Zulassung bzw. Beschränkung von Gefahrguttransporten für alle unter Betrieb befindlichen Tunnel bis zum 30.04.2014 abzuschließen. Soweit Beschränkungen bereits vorhanden bzw. vorgesehen sind, ist nach dem ADR 2007 die Umsetzung bis zum 31.12.2009 erforderlich.

Für Deutschland war daher ein praktikables Verfahren zu entwickeln, mit dem die Gefahrgutrisiken für alle Tunnel auf Basis von Risikoanalysen einheitlich bewertet und Einschränkungen für den Gefahrguttransport durch definierte Tunnelkategorien kenntlich gemacht werden können.

## 2 Zielsetzung und Abgrenzung

### 2.1 Forschungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem jeder Straßentunnel für die Durchfahrt von Gefahrguttransporten einer

Tunnelkategorie nach ADR 2007 zugeordnet werden kann. Eine mögliche Integration des verbreiteten OECD/PIARC Modells war dabei zu prüfen. Zur Vermeidung eines unverhältnismäßigen Aufwands für die Gefahrgut-Risikoanalysen sollte ein mehrstufiges Verfahren zum Einsatz kommen, mit dem für einen Teil der Straßentunnel mit Hilfe einer vereinfachten Betrachtung über die Zulassung von Gefahrguttransporten entschieden werden kann.

### 2.2 Abgrenzung

Das vorliegende Verfahren ist speziell auf die Besonderheiten, die sich aus den Gefahrgutrisiken ergeben, fokussiert. Eine Anwendung des Verfahrens zur Risikobewertung von Straßentunneln infolge Vorliegens einer besonderen Charakteristik<sup>2</sup>, für das in einem früheren Forschungsprojekt bereits eine Methodik entwickelt wurde [BAST 2007], ist daher nicht möglich.

Die Umsetzung der bereits entwickelten Methodik hinsichtlich der Risikobewertung bei einer besonderen Tunnelcharakteristik ist in einem vor der Veröffentlichung stehenden Leitfadens zur Anwendung beschrieben [BAST 2008].

Das Verfahren zur Kategorisierung wird in diesem anwenderorientierten Hauptbericht mit seinen Anforderungen und notwendigen Randbedingungen beschrieben. Hintergründe, Herleitungen und wissenschaftliche Grundlagen sind in dem Anhang 1 zu diesem Bericht zusammengestellt. Der Anhang 2 beinhaltet zur Erläuterung des Verfahrens Anwendungsbeispiele. Ergänzend zu den Modellbeschreibungen des eingesetzten OECD/PIARC QRAM sind in Anhang 3 Eingabehilfen zusammengestellt.

## 3 Methodik von Gefahrgutrisikoanalysen

### 3.1 Grundlagen

#### 3.1.1 Normative Grundlagen

Die rechtlichen Grundlagen für eine Kategorisierung der Tunnel sind auf europäischer Ebene das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße

<sup>1</sup> Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route [ADR 2007]

<sup>2</sup> ausgenommen Parameter für besondere Charakteristik „Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs“ nach [RABT 2006], Abschnitt 0.4

(ADR) in der Fassung von 2007 [ADR 2007] sowie die EG-Tunnelrichtlinie [EG 2004], die in den nationalen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) [RABT 2006] umgesetzt wurde. Die Novellierung des ADR in der Fassung von 2009 [ADR 2009] wurde soweit relevant in dem Verfahren berücksichtigt.

#### EG-Tunnelrichtlinie 2004/54/EG

Gemäß der EG-Tunnelrichtlinie sind für alle Tunnel, die innerhalb des Transeuropäischen Straßennetzes liegen (TERN) und die länger als 500 m sind, vor der Festlegung bzw. Änderungen der Vorschriften bzgl. Gefahrguttransporten Risikoanalysen gem. Artikel 13 durchzuführen. Weiterhin sind die EG-Mitgliedsstaaten aufgefordert für Ihre nicht innerhalb des TERN liegenden Tunnel ein gleiches Sicherheitsniveau zu schaffen.

#### RABT 2006

Mit der Umsetzung der EG-Tunnelrichtlinie in den RABT 2006 wurde diese Forderung erreicht. Die Vorgaben sind in den Abschnitten 0.4 und 0.5 sowie dem Abschnitt 9 geregelt. Nach den RABT sind für alle Tunnel mit einer Länge  $\geq 400$  m Risikoanalysen durchzuführen, wenn Festlegungen bzw. Änderungen der Vorschriften bzgl. Gefahrguttransporte vorgenommen werden. Bei Vorhandensein von Alternativrouten sind diese in das Risikoanalyseverfahren mit einzubeziehen. Darüber hinaus sind beim Vorliegen einer besonderen Charakteristik (z. B. Umfang und Zusammensetzung) hinsichtlich der Gefahrguttransporte ebenfalls Risikoanalysen erforderlich.

#### ADR 2007/2009

Das ADR regelt die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße. Die Gefahrgüter sind in die Klassen 1-9 (s. Tab. 1) unterteilt. Dabei wird jedem Gefahrgut eine UN-Nummer zugeordnet mit jeweiligen Vorschriften zu dessen Verpackung, Mengengrenzung, Regelung zur Beförderungsdurchführung, des zu verwendenden Fahrzeugs und zzgl. eventuell anzuwendende Sondervorschriften. Seit 2007 ist für jedes Gefahrgut auch ein Tunnelbeschränkungscode festgelegt, der mit den Änderungen in 2009 z. T. modifiziert wurde.

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

Tab. 1: Gefahrgutklassen nach ADR

Der Tunnelbeschränkungscode berücksichtigt die Wirkungsart und die Ausmaßhöhe im Ereignisfall<sup>3</sup>. Folglich ist für den Fall einer Durchfahrtsbeschränkung gefährlicher Güter durch Tunnel je nach örtlicher Gegebenheit und dem Ergebnis der durchgeführten Risikoanalyse der Tunnel einer Tunnelkategorie gem. Tab. 2 zuzuordnen.

<sup>3</sup> Die Änderungen in den Anlagen A und B des ADR 2009 führen zu einer punktuellen Neueinordnung einzelner Stoffe gegenüber ADR 2007. Diese Änderungen sind in diesem Bericht berücksichtigt.



Kategorie	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 <ul style="list-style-type: none"> <li>sehr großen Explosion führen können</li> </ul>
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> <li>sehr großen Explosion ("B"-Güter)</li> <li>großen Explosion</li> <li>umfangreichen 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 ("B"-Güter)</li> <li>großen Explosion ("C"-Güter)</li> <li>umfangreichen Freiwerden giftiger Stoff ("C"-Güter)</li> <li>großen Brand führen können</li> </ul>
E	Beschränkungen für alle gefährlichen Güter außer UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 and 3373

Tab. 2: Tunnelkategorien nach ADR 2007

Für die Durchfahrt durch einen Tunnel ist der jeweils restriktivste Code für einen Stoff der gesamten Ladung maßgeblich. Die Tunnel können die Beschränkungscode B, B1000C, B/D, B/E, C, C5000D, C/D, C/E, D, D/E, E haben. Die zusammengesetzten Codes regeln die Beschränkung in Abhängigkeit von der Masse bestimmter Güter oder der Beförderungsart. An dieser Stelle sei auf den Abschnitt 8.6.4 des ADR verwiesen.

Ist dem Gefahrgut kein Tunnelbeschränkungscode zugeordnet, ist die Durchfahrt durch alle Tunnel erlaubt.

Die Tunnelkategorie wird gemäß StVO am Portal bzw. im Zufahrtbereich durch das Zeichen 261 (Verbot für kennzeichnungspflichtige Kraftfahrzeuge mit gefährlichen Gütern) in Kombination mit einem Zusatzschild für die Tunnelkategorie B bis E angezeigt (s. Bild 1). Darüber hinaus ist es möglich, einen Tunnel unterschiedlichen Tunnelkategorien zuzuordnen. Dies kann z. B. in Abhängigkeit der Tageszeit oder dem Wochentag geschehen.

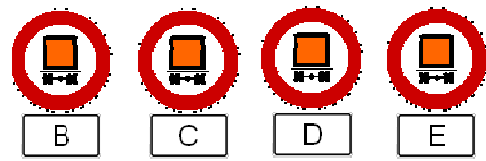


Bild 1: Beschilderung von Tunneln mit Beschränkung für Gefahrguttransporte

Sind keine Beschränkungen für einen Tunnel vorgesehen (Tunnelkategorie A) wird keine besondere Beschilderung angeordnet.

Bei vorliegender bzw. beabsichtigter Beschränkung des Transports von gefährlichen Gütern sind nach dem ADR alle Tunnel den entsprechenden Tunnelkategorien bis zum 31.12.2009 zuzuordnen und mit der notwendigen Beschilderung kenntlich zu machen. Darüber hinaus ist eine ggf. zu nutzende Alternativroute entsprechend zu beschildern.

### 3.1.2 Generelle Methodik zur Risikoabschätzung

Zur Risikoabschätzung ist grundsätzlich eine Vielzahl von Methoden möglich. Diese reichen von reinen Expertenrunden, bei denen ein Tunnel qualitativ bewertet wird, über andere qualitative und semiquantitative Verfahren bis hin zu rein quantitativen Verfahren. Diese werden alle in der Praxis je nach Mitgliedsstaat der EU und Verfahrensstufe angewandt.

Wegen der komplexen Zusammenhänge haben sich in der Praxis zur Ermittlung von zuverlässigen Ergebnissen quantitative Verfahren durchgesetzt. Sie erfordern eine Methodik, die eine Quantifizierung der Gefahren ermöglicht. Zur Quantifizierung der Risiken ist die Beantwortung folgender drei Basisfragen erforderlich:

- Was kann sich ereignen?
- Wie häufig kann es eintreten?
- Was sind die Auswirkungen?

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt mittels quantitativer Risikoanalysen, wodurch nachfolgend aufgeführte Arbeitsschritte notwendig werden:

- Ablaufmodellierung
- Häufigkeitsermittlung
- Schadensausmaßermittlung
- Risikoermittlung
- Risikobewertung

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz beschrieben.

### Ablaufmodellierung

Ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) werden Ereignisabläufe mit Hilfe von Ereignisbäumen generiert. Wesentliches Merkmal dieser Ereignisabläufe ist die transparente Darstellung über sämtliche mögliche Zwischenzustände bis hin zum jeweiligen Endzustand. Initialereignisse können beispielsweise die Freisetzung gefährlicher Güter oder das Abbrennen bzw. die Explosion von Gefahrgütern sein.

### Häufigkeitsermittlung

Die zu erwartenden Häufigkeiten der Endzustände werden über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$H_{e,i} = H_0 \cdot \prod P_i$$

- $H_{e,i}$ : Häufigkeit der Endzustände
- $H_0$ : Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses
- $P_i$ : Verzweigungswahrscheinlichkeiten  $P$  im Zweig  $i$

Für diese Berechnung werden die Häufigkeiten des auslösenden Ereignisses und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten benötigt. Diese werden z. B. für das Initialereignis aus empirischen Werten und für die Verzweigungswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von statistischen Grundlagen, generischen Methoden (z. B. Fehlerbäumen) oder Annahmen bestimmt. Die Summe der Verzweigungswahrscheinlichkeiten in einem Verzweigungspunkt ist stets gleich eins.

### Schadensausmaßermittlung

Die Ermittlung von Schadensausmaßen erfordert i. d. R. die Anwendung von Ausbreitungs- und Wirkungsmodellen. Je nach erforderlichem Detaillierungsgrad kommen dabei in der Praxis unterschiedliche Modelle zu Einsatz. Neben vergleichsweise einfachen Hilfsmitteln (z.B. Abschätzungen über Nomogramme, Abschätzungsformeln u. ä.) kommen auch komplexe Rechenmodelle mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zum Einsatz. So lassen sich beispielsweise mit Hilfe von CFD-Modellen die relevanten Größen Druck, Temperatur, Geschwindigkeit und Konzentration raum- und zeitabhängig detailliert ermitteln. Durch eine Überlagerung mit Evakuierungs- und Fluchtmodellen sowie mit expositionsabhängigen Letalitäten kann so auf das jeweilige Schadensausmaß geschlossen werden.

### Risikoermittlung

Als Maß für das Gefährdungspotential dient das Risiko, welches sich aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände mit dem jeweiligen Schadensausmaß ergibt. Die quantitative Darstellung des Risikos kann als Punktwert (Schadenerwartungswert bzw. EV<sup>4</sup>-Wert)

$$R = \sum_{i=1}^m (H_{e,i} A_{e,i})$$

- $m$ : Anzahl der Endzustände im Ereignisbaum
- $H_{e,i}$ : Häufigkeit der Endzustände
- $A_{e,i}$ : Schadensausmaß für jeweiligen Endzustand

oder über ein Summenhäufigkeitsdiagramm erfolgen (siehe Bild 2).

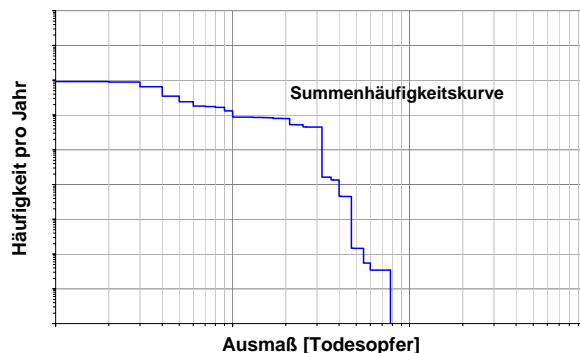


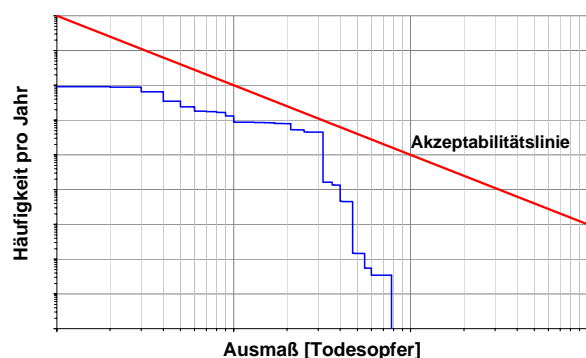
Bild 2: Summenhäufigkeitsdiagramm

### Risikobewertung

Die Bewertung von Risiken erfordert die Definition eines Vergleichsmaßstabs<sup>5</sup>. Ohne eine Festlegung von Akzeptabilitäten, lassen sich nur relative Vergleichsrechnungen durchführen. Beispielhaft ist im nachfolgenden Bild 3 eine Risikoakzeptabilitätslinie zur Sicherheitsbewertung dargestellt.

<sup>4</sup> Expected Value

<sup>5</sup> Die Vergleichswerte müssen auf das jeweilige Analyseverfahren abgestimmt sein



**Bild 3:** Risikoakzeptanzkurve als Sicherheitskriterium für Industrieanlagen in den Niederlanden

### 3.1.3 Methodik für Gefahrgutrisikoplanalysen in Straßentunneln

Für die Untersuchung von Risiken beim Transport gefährlicher Güter durch Straßentunnel liegen heute bereits verschiedene Methoden und Anwendungserfahrungen im In- und Ausland vor. Das Spektrum der angewandten Methoden ist sehr breit und richtet sich nach dem jeweilig erforderlichen Tiefgang bzw. der jeweiligen spezifischen Fragestellung.

Vereinfachte Verfahren und Modelle können die komplexen Interaktionen zwischen Tunnel, Tunnelnutzern, Sicherheitsausstattung und Gefahrgutwirkungen nicht oder nur bedingt erfassen. Eine Anwendung ist jedoch möglich, wenn ausreichende Erfahrungen für Standardsituationen vorliegen oder die Anforderung an die differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Gefahrgutrisiken nur bedingt erforderlich ist.

Nachfolgend sind die wichtigsten spezifischen Aspekte zu den Erfahrungen mit Gefahrgutrisikoplanalysen für Straßentunnel zusammengefasst, gegliedert nach den üblichen Schritten eines risikobasierten Vorgehens:

#### Systemabgrenzung und –definition

- **Untersuchtes System:** Ausgangspunkt für die Risikountersuchungen sind die Gefahren und die damit verbundenen Risiken aus dem Transport gefährlicher Güter durch einen bestimmten Straßentunnel. In vielen Fällen ist aber nicht nur der Tunnel selbst Gegenstand der Untersuchungen, sondern es werden die resultierenden Risiken zweier möglicher Transportrouten (Route mit Tunnelstrecke und mögliche Umfahrstrecke) miteinander verglichen.
- **Schadenindikatoren:** Hinsichtlich der untersuchten Schadenindikatoren werden mehrheitlich nur Personenrisiken untersucht. Andere Schadenindikatoren wie beispielsweise Umwelt-, Sachschäden oder betriebliche Auswirkungen und damit verbundene Kostenfolgen werden kaum bzw. nur in qualitativer Form untersucht.
- **Gefahrgutspektrum:** Das Spektrum der Gefahrgüter wird i. d. R. über repräsentative Szenarien für Stoffe/Stoffgruppen<sup>6</sup> abgebildet.
- **Datengrundlagen:** Die Erfahrung zeigt, dass in den meisten Fällen die für die Zwecke der Risikoanalyse erforderlichen Datengrundlagen hinsichtlich Tunnel und zugehöriger Infrastruktur einfach zu beschaffen und in der erforderlichen Güte vorhanden sind. Schwieriger ist die Beschaffung abgestützter, ortsspezifischer Angaben zum Gefahrgutaufkommen, weshalb man sich häufig auf statistische Mittelwerte für Gesamtdeutschland abstützen muss.

<sup>6</sup> Häufig werden die verschiedenen Stoffe aufgrund ihrer jeweiligen maßgeblichen Charakteristik (z. B. Aggregatzustand, Hauptwirkungsart, etc.) zu gleichartigen Gruppen oder so genannten Leitstoffen zusammengefasst.

### Risikoanalyse und Risikodarstellung

- Die Mehrzahl der heute angewandten Methoden basiert auf quantitativen Ansätzen zur Ermittlung der Risiken. Dazu werden die Eintretenshäufigkeiten sowie die jeweils resultierenden Schadenausmaße für die gewählten Szenarien mit zugehörigen spezifischen Modellen und teilweise auch komplexen Simulationen ermittelt.
- Die untersuchten Szenarien berücksichtigen die drei Hauptwirkungsarten Brand, Explosion sowie toxische Wirkungen.
- Als Risikomaß wird überwiegend das so genannte kollektive Risiko in Form von Summenkurven in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen verwendet. Daneben wird das kollektive Risiko teilweise auch als Schadenerwartungswert dargestellt.<sup>7</sup>

### Risikobewertung

- Ein zentraler Aspekt stellt die Bewertung der ermittelten Gefahrgutrisiken dar.
- Bei vergleichenden Untersuchungen (Vergleich zwischen Tunnelroute und einer möglichen Alternativroute) werden (meist) die resultierenden Risiken miteinander verglichen.
- In einigen Ländern (z. B. Schweiz, Niederlande) existieren anerkannte (absolute) Bewertungskriterien, anhand derer die Akzeptabilität der Risiken bestimmt werden kann.

### Maßnahmenplanung

- Erfahrungsgemäß lassen sich Gefahrgutrisiken für einen richtlinienkonform ausgestalteten Tunnel durch die Umsetzung zusätzlicher baulich-technischer Sicherheitsmaßnahmen reduzieren. Hierfür stehen betriebliche Maßnahmen, z. B. Transportbeschränkungen wie sie auch ADR 2007 vorsieht, im Vordergrund. Für in der Planung oder im Bau befindliche Tunnel können allerdings auch baulich-technische Maßnahmen (z. B. kürzere Notausgangsabstände, mit großen Feuerwehrfahrzeugen befahrbare Rettungstollen von Gegenverkehrstunneln, stationäre Feuerlöschanlagen, Leiteinrichtungen) im Rahmen der Risikoanalyse betrachtet werden.

## 4 Übersicht zum Verfahren

### 4.1 Struktur

Das vorliegende Verfahren zur risikobasierten Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007 ist zweistufig aufgebaut und ist schematisch in Bild 4 dargestellt:

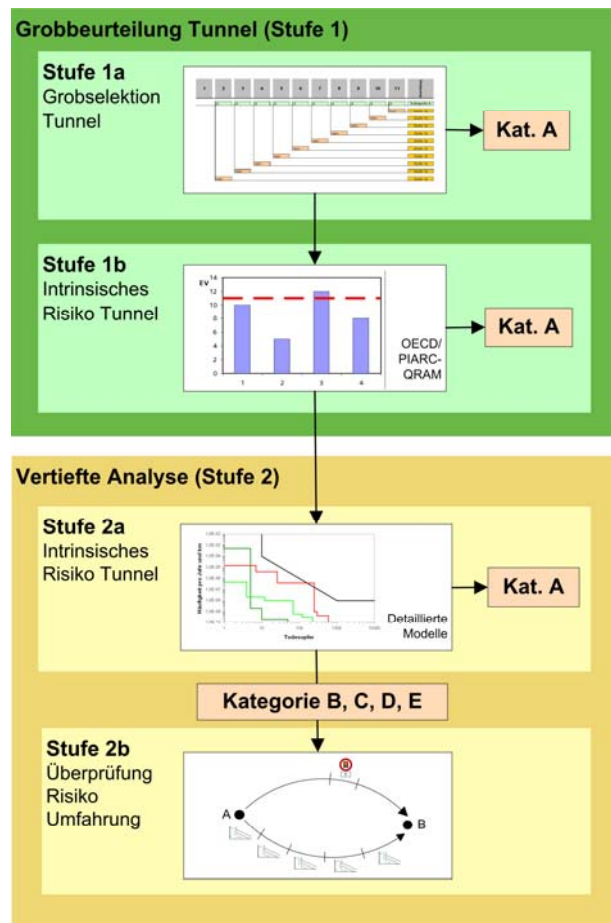


Bild 4: Verfahrensablauf - Schema

In einer Grobbeurteilung (Stufe 1) wird in zwei Schritten ein Tunnel dahingehend überprüft, ob dieser für sämtliche Gefahrguttransporte freigegeben werden kann.

Werden die Gefahrgutrisiken mit den einfachen Modellen der Stufe 1 als zu hoch bewertet, muss der Tunnel vertieft untersucht werden. Bei dieser vertieften Analyse (Stufe 2a) wird zunächst das intrinsische Risiko<sup>8</sup> des Tunnels mit detaillierten Modellen und verfeinerten Eingangsdaten be-

<sup>7</sup> Erfahrungsgemäß vermag diese Darstellungsform die spezifische Charakteristik von Gefahrgutrisiken nur bedingt abzubilden.

<sup>8</sup> Ausschließliche Betrachtung des Tunnelrisikos ohne äußere Einflüsse (Zulaufstrecken etc.).

stimmt. Liegt das ermittelte Risiko unterhalb einer auf Erfahrungswerten beruhenden Vergleichskurve, kann der Tunnel für sämtliche Gefahrguttransporte freigegeben werden. Liegt die Risikokurve oberhalb der Vergleichskurve, wird der Tunnel nach Bedarf kategorisiert, d. h. er wird für Transporte von Gefahrgütern mit gleichem Tunnelbeschränkungscode gesperrt bzw. es werden bauliche, technische oder organisatorische Maßnahmen getroffen um das Risiko zu reduzieren.

Im Falle einer Beschränkung sind die betroffenen zu transportierenden Güter über eine Umfahrungsstrecke zu leiten. Für die Umfahrungsstrecke ist in der Stufe 2b nachzuweisen, dass sie die aus der Umlegung resultierenden zusätzlichen Gefahrgutrisiken aufnehmen kann. Der Umgang mit dem Sonderfall, dass die Umlegung nicht möglich ist wird in Kap. 6.4.6 beschrieben.

## 4.2 Anwendungsgrundsätze

Das vorliegende Verfahren beschreibt eine risikobasierte Überprüfung von Tunneln bezüglich Gefahrgutrisiken und dient als Entscheidungshilfe für eine Freigabe bzw. Einschränkung von Gefahrguttransporten.

Grundsätzlich sollte das Verfahren vollständig unter Beachtung aller genannter Grenzwerte und Anforderungen gewählt werden. Ein Abbruch ist nur vorgesehen, wenn der zu untersuchende Tunnel aufgrund der durchgeführten Risikobetrachtung und seiner Besonderheiten in einer der Stufen als unkritisch bewertet wird, d. h. alle Gefahrguttransporte dürfen uneingeschränkt durch den Tunnel geleitet werden.

Insbesondere die Grobbeurteilung (Stufe 1) sieht vereinfachte Modelle vor, mit denen die überwiegende Zahl aller deutschen Tunnel ausreichend abgebildet werden kann. In Einzelfällen können die Randbedingungen jedoch zu Sonderfällen und -konstruktionen führen, die mit den vorliegenden Modellen nicht erfasst werden<sup>9</sup>. Hier liegt es im Verantwortungsbereich der Verwaltung bzw. des Anwenders diese Besonderheiten zu erkennen und ihre Risikorelevanz abzuschätzen. Dies kann zu einer weiteren Untersuchung (z. B. vertiefte Analyse) in der folgenden Teilstufe führen<sup>10</sup>. Aus diesen

Gründen ist für die Durchführung des Verfahrens in jeder Stufe ausreichend qualifiziertes Personal einzusetzen.

## 5 Stufe 1 – Grobbeurteilung

### 5.1 Übersicht

Die Grobbeurteilung des Tunnels erfolgt in der ersten Stufe des Verfahrens mit dem Ziel die Entscheidung zu treffen, ob Gefahrguttransporte uneingeschränkt durch den Tunnel zugelassen werden oder ob eine vertiefte Analyse gemäß Stufe 2 zur Beurteilung erforderlich ist. Die Grobbeurteilung setzt sich aus der Stufe 1a (reines Kenngrößenverfahren) und der Stufe 1b (risikobasierte, quantitative Entscheidungsgrundlage auf Basis einer Berechnungsverfahren) zusammen. In Bild 5 ist der Ablauf der Grobbeurteilung dargestellt.

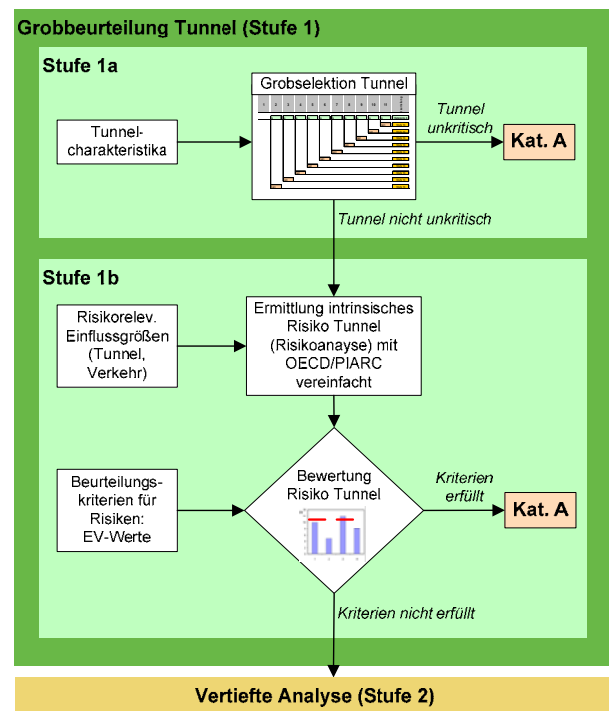


Bild 5: Übersicht Grobbeurteilung

### 5.2 Stufe 1a - Kenngrößenverfahren

Mit Hilfe eines Kenngrößenverfahrens wird ein Tunnel durch eine Grobselektion überprüft. Der

<sup>9</sup> Zum Beispiel Versagen der Tunnelschale infolge Feststoffexplosionen bei Unterwassertunneln mit geringer Überdeckung.

<sup>10</sup> Ebenso ist in begründeten Fällen unter Abwägung aller Randbedingungen der Verzicht auf eine Beschrän-

kung für GG-Transporte denkbar, auch wenn ein einzelner Grenzwert überschritten sein sollte.

Aufwand, die notwendigen Daten zu erheben, ist auf ein Mindestmaß beschränkt. Hierbei werden die in Bild 6 dargestellten Ausschlusskriterien über einen Entscheidungsbaum überprüft.

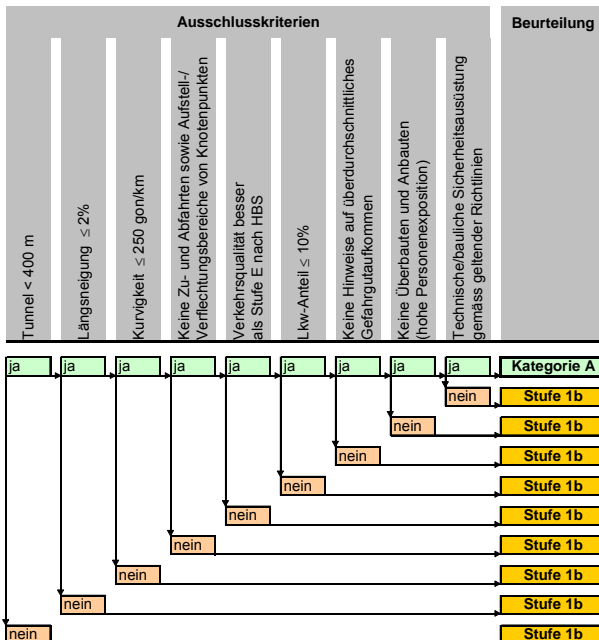


Bild 6: Stufe 1a - Kenngrößenverfahren

Eine Beschränkung der Tunnel für Gefahrguttransporte ist nicht erforderlich, wenn ausnahmslos alle Anforderungen erfüllt sind. Die maßgeblichen risikorelevanten Anforderungen sind so gewählt, dass Tunnel, die alle Kriterien erfüllen, sowohl bezüglich der Häufigkeit von Ereignissen als auch des möglichen Ausmaßes unterhalb der Bewertungskriterien unter Anwendung der Stufen 1b und 2a liegen. Die einzelnen Kriterien werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

#### Tunnellänge < 400 m

Die Begrenzung der Tunnellänge hat sowohl Auswirkung auf die Häufigkeit von Schadensereignissen als auch auf das mögliche Ausmaß. Der Grenzwert von 400 m entspricht der Länge, ab der erweiterte technische Ausstattungen nach RABT erforderlich sind.

#### Längsneigung $\leq 2\%$

Als maßgebliche Längsneigung ist die gewichtete mittlere Längsneigung wie im Leitfaden [BAST 2008] zu berücksichtigen. Diese berechnet sich wie folgt:

- Grobe Unterteilung des Tunnels in Abschnitte mit unterschiedlicher Längsneigung,
- Bestimmung der jeweiligen Länge und des Absolutwerts der Längsneigung,
- Ermittlung der gewichteten mittleren Längsneigung der Tunnelröhre<sup>11</sup>

Hintergrund für die Begrenzung der Längsneigung ist die mit zunehmender Steigung abnehmende Geschwindigkeit des Schwerverkehrs. Für nähere Erläuterungen wird auf den Anhang verwiesen.

#### Kurvigkeit $\leq 250$ gon/km

Eine starke Kurvigkeit kann potenziell zu einer erhöhten Häufigkeit von Unfällen führen. Um diese zu begrenzen ist eine gestreckte Trassierung sinnvoll. Daher wird hier eine maximale Kurvigkeit von 250 gon/km zugelassen.

#### Zu- und Abfahrten bzw. Aufstellbereiche im Tunnel

Da Zu- und Abfahrten im Tunnel bzw. Verflechtungsbereiche und Aufstellflächen an Lichtsignalanlagen nachgelagerter Knotenpunkte einen erheblichen Einfluss auf die Unfallhäufigkeit haben, sind diese in der Stufe 1a auszuschließen.

#### Verkehrsqualität besser als Stufe E nach HBS

Die Einflüsse von Weg-, Verkehrs- und Steuerungsbedingungen (Fahrstreifenanzahl, Verkehrsbelastung, Stauhäufigkeit etc.) stehen in Interaktion. Die komplexen Zusammenhänge und ihre Wirkung auf den Verkehrsfluss können über die Verkehrsqualität nach dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [HBS 2001] beschrieben werden. Zur Begrenzung der Unfallhäufigkeit ist mindestens ein stabiler Verkehrsfluss zu gewährleisten. Dies entspricht den Verkehrsqualitätsstufen A, B, C oder D nach HBS.

#### LKW-Anteil $\leq 10\%$

Da mit steigendem LKW-Anteil i. d. R. auch der Anteil an Gefahrguttransporten steigt, ist im Rahmen des Kenngrößenverfahrens maximal ein für

<sup>11</sup> Zur Bestimmung der gewichteten mittleren Längsneigung sind die Absolutwerte der jeweiligen abschnittsspezifischen Längsneigungen heranzuziehen.

deutsche Fernstraßen durchschnittlicher Wert von 10 % zulässig.

#### Kein überdurchschnittliches Gefahrgut-Aufkommen

Für eine Beurteilung in der Stufe 1a ist einzuschätzen, dass der Gefahrgutanteil nicht überdurchschnittlich ist. Liegen keine ortsspezifischen Verkehrserhebungen vor, ist zu prüfen, ob die Strecke mit dem zu untersuchenden Tunnel als Erschließung von Erzeugern, Abnehmern oder Umschlagplätzen von Gefahrgutstoffen dient und somit von einem erhöhten Gefahrgutaufkommen auszugehen ist.

#### Keine Überbauten/Anbauten mit hoher Personenexposition

Infolge der Freisetzung von Gefahrgüter, großen Bränden oder Explosionen besteht die Gefahr, dass infolge einer Zerstörung des Bauwerks oder die Freisetzung über die Portale in Kombination mit einer intensiven Nutzung der Fläche oberhalb des Tunnels ein erhöhtes Schadensausmaß gegenüber eines vergleichbaren Ereignisses auf der freien Strecke oder in einem Tunnel, der diese Charakteristik nicht aufweist, zu erwarten ist.

Zur Entscheidung ob eine solche Charakteristik vorliegt oder nicht können keine allgemeingültigen absoluten Grenzwerte oder vollständige Listen formuliert werden. Insbesondere hängt das Gefährdungspotenzial von der Überdeckung ab. Als Hilfe zur Anwendung werden in der folgenden Zusammenstellung beispielhaft mögliche An- und Überbauten im Sinne dieses Verfahrens genannt.

- offene Gewässer mit und ohne Schifffahrt
- Einkaufszentren
- Veranstaltungs- und Kongresszentren
- Sporthallen/Stadien
- Parkhäuser
- verdichtete mehrgeschossige Wohnbebauung
- Straßenbahnhaltestellen
- Rollbahnen und Abfertigungsgebäude von Flughäfen
- Bahnhofsanlagen
- etc.

#### Technisch/Bauliche Sicherheitsausstattung gemäß Regelwerk

Zur Gewährleistung eines aktuellen Standes bei der technischen und baulichen Sicherheitsausstattung muss der betrachtete Tunnel die Anforderungen der geltenden Regelwerke erfüllen.

## 5.3 Stufe 1b - OECD/PIARC QRAM

Erfüllt ein zu untersuchender Tunnel ein oder mehrere Kriterien der Stufe 1a nicht oder verfügt der Tunnel nach fachtechnischer Einschätzung des Anwenders über spezifische Merkmale, deren Risikorelevanz in Stufe 1a nicht abgeschätzt werden kann, ist der Tunnel in der Stufe 1b unter Anwendung des OECD/PIARC Modells zu untersuchen.

Für die Anwendung des Modells wird auf das detaillierte Benutzerhandbuch [INER 2005b] verwiesen. Die für die Anwendung im Rahmen des Verfahrens maßgeblichen Randbedingungen werden in den Abschnitten 5.3.1 ff erläutert.

### 5.3.1 Hinweise zum Programm

Mit Hilfe des kommerziellen und in der EU verbreitet angewendeten OECD/PIARC QRAM<sup>12</sup> 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. Für die Entwicklung standen dabei weiträumige Streckenabschnitte im Vordergrund, z. B. zur Alpenquerung. Daher sind die Ausbreitungsmodelle für Tunnel sehr konservativ und bilden Feinheiten nur begrenzt ab. Im Rahmen einer Grobanalyse steht damit jedoch ein sinnvolles, handhabbares und in verschiedenen Ländern der EU bereits angewendetes Modell zur Verfügung.

### 5.3.2 Szenarien

Zur Berechnung der für Gefahrguttransporte wesentlichen Risikokenngrößen sind die Szenarien 3 - 13 des Modells<sup>13</sup> maßgeblich. Die Szenarien 1 und 2 beschreiben LKW-Brände von 20 MW bzw. 100 MW. Diese Risiken sind mit konventionellen Lkw-Bränden vergleichbar und im Gesamtsicherheitskonzept bereits berücksichtigt. Im Folgenden werden alle Szenarien (einschließlich der nicht zu berücksichtigenden Szenarien 1 und 2) kurz zusammengestellt. Für eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle auf den Anhang bzw. den Forschungsbericht [INER 2005a] verwiesen.

- 1 (Brandereignis von 20 MW  
→ konventioneller Lkw-Brand, wird hier nicht berücksichtigt)

<sup>12</sup> Bezugsquelle: [PIARC 2009]

<sup>13</sup> Zu jedem Szenario sind die zugehörigen Parameter wie z. B. Beginn und Verlauf eines Brandes sowie weitere stoffspezifische Kenndaten hinterlegt.

- 2 (Brandereignis von 100 MW  
→ konventioneller Lkw-Brand, wird hier nicht berücksichtigt)
- 3 Heiße Gasdruckexplosion (BLEVE<sup>14</sup>) von 50 kg-Propangasflaschen
- 4 Kraftstoff-Lachenbrand (pool-fire)
- 5 Heiße Gaswolkenexplosion von ausgetretenen Benzindämpfen (VCE<sup>15</sup>)
- 6 Austreten giftiger Gase - Chlortank 20 t
- 7 Heiße Gasdruckexplosion (BLEVE) von 18 t-Propangastank
- 8 Heiße Gaswolkenexplosion von ausgetretenem Propan aus 18 t-Gastank (VCE)
- 9 Freistrahbrand von unter Druck austretendem Propan aus 18 t-Gastank (Torch-Fire<sup>16</sup>)
- 10 Austreten giftiger Gase (Ammoniak) aus 18 t-Tank
- 11 Austreten giftiger Flüssigkeit (Acrolein) aus 25 t-Tank
- 12 Austreten giftiger Flüssigkeit (Acrolein) aus 100 l-Flaschen
- 13 Druckwirkung einer Gasexplosion von 20 t verflüssigtem CO<sub>2</sub> („kalter BLEVE“)

Mit den Szenarien werden im Wesentlichen alle notwendigen Gefahrgutrisiken betrachtet. Eine mögliche Gefährdung infolge einer Feststoffexplosion (z. B. TNT) in deren Folge das Bauwerk zerstört werden könnte und zusätzliche Schadensausmaße zu berücksichtigen sind (s. a. Abschnitt 5.2, Keine Überbauten/Anbauten mit hoher Personenexposition), ist vom Anwender ggf. zu berücksichtigen.

### 5.3.3 Eingangsdaten

Als Eingangsdaten für die Modellierung des Tunnels, seiner betriebstechnischen Ausstattung und der verkehrlichen Situation sind grundsätzlich die objektspezifischen Merkmale<sup>17</sup> zu erheben und soweit möglich abzubilden. Dazu sind die folgenden Unterlagen notwendig:

- Lageplan
- Höhenplan
- Querschnitte
- Bestand der betriebstechnischen Ausstattung
- Lüftungsgutachten für Normalbetrieb und Brandfall
- Detaillierte Verkehrsdaten mit Verkehrszusammensetzung (z. B. aus Verkehrsgutachten)
- Tages- bzw. Jahresganglinien für DTV, SV, GG
- Unfallstatistik, Unfallmeldebögen
- Gefahrgutzusammensetzung

Sind Tunnel- bzw. streckenspezifische Daten nicht mit vertretbarem Aufwand zu ermitteln, dürfen für Deutschland allgemeingültige Durchschnittswerte angenommen werden. Grundsätzliche Hinweise sowie Angaben zu Durchschnittswerten werden in den folgenden Abschnitten genannt.

#### Schadenindikator

Maßgebender Schadenindikator für die Risikoberechnung ist die Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer und getöteter Personen im Portalbereich.

#### Zeitperioden

Es können bis zu drei Zeitperioden pro Tunnelrichtung definiert werden (normal, quiet, peak). Die Anzahl der zu wählenden Zeitperioden hängt von den Tages- bzw. Jahresganglinien ab. Für jeden zeitlichen Anteil am Tag bzw. im Jahr sollen die folgenden Parameter möglichst homogen verteilt sein:

<sup>14</sup> BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion

<sup>15</sup> VCE: Vapour Cloud Explosion

<sup>16</sup> Torch Fire: Fackelbrand, Freistrahbrand

<sup>17</sup> die Merkmale haben einer richtliniengetreuen Ausstattung zu entsprechen.



- Fahrzeugbesetzungsgrad PKW
- Fahrzeugbesetzungsgrad LKW
- Fahrzeugbesetzungsgrad Busse
- Gefahrguttransporte pro Stunde
- Gefahrgutzusammensetzung
- Verkehrsbelastung pro Stunde
- Schwerverkehrsanteil
- Busanteil
- PKW-Geschwindigkeit
- LKW-Geschwindigkeit
- Anzahl Fahrstreifen
- LKW-Unfallrate und Gefahrgutkorrekturfaktor

Im Regelfall sind mindestens zwei Zeitperioden für verschieden Tageszeiten (tagsüber - *normal* - und nachts - *quiet* -) zu definieren. Weitere Möglichkeiten, spezifische Besonderheiten zu berücksichtigen können z. B. sein:

- Spitzenstunde - *peak* - mit oder ohne Stauneigung
- Erschließung von Urlaubsgebieten mit jahreszeitlichen Schwankungen
- etc.

### Unfallraten

Die Unfallraten sind von vielen Parametern abhängig und somit streckenspezifisch. Liegen keine Unfallstatistiken für den zu untersuchenden Tunnel vor können die Werte entsprechend [BAST 2008] der folgenden Tabelle entnommen werden.

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. 3: Eingangsparameter Unfallrate

### Gefahrgutzusammensetzung

Zur Abbildung der Gefahrgutrisiken sind die Mengenanteile der zu den in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Szenarien gehörigen Gefahrgüter anzugeben. Sofern keine streckenspezifischen Erhebungen vorliegen, können die in Tab. 4 aufgeführten Werte verwendet werden. Die Herleitung der Werte ist im Anhang beschrieben.

Gefahrgut	Anteil
Anteil aller brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransporte) - z. B. Benzin, Diesel, etc.	0,2450
davon: Anteil leicht entflammbarer brennbaren Flüssigkeiten (Tanktransport) - z. B. Benzin, etc.	0,5000
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. 4: Standard Gefahrgutverteilung für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM

### Verkehrsdaten

Zur Eingabe von verkehrsspezifischen Daten (s. a. Abschnitt Zeitperioden) ist es sinnvoll die jeweiligen für den Tunnel gültigen Werte anzuwenden, da Durchschnittswerte nur auf Basis von sehr stark streuenden Vergleichswerten bestimmt werden können. Liegen keine für den Tunnel geltenden Werte vor, können die Werte aus der folgenden Tabelle (Tab. 5) genutzt werden.

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>18</sup>	1,3·DTV/24
Verkehrsstärke pro Stunde Nacht <sup>18</sup>	0,5·DTV/24
Personenbesetzungsgrad PKW	1,5
Personenbesetzungsgrad LKW	1,1
Personenbesetzungsgrad Bus	40
Korrekturfaktor Unfallrate f. GG-Transporte	1
Geschwindigkeit PKW	$v_{zul}$
Geschwindigkeit LKW	$\min(80, HBS^{19}, v_{zul})$

Tab. 5: Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM

#### 5.3.4 Bewertungskriterium

Als Bewertungskriterium werden bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM auf 1 km Tunnellänge normierte Schadenerwartungswerte<sup>20</sup> (EV-Werte) verwendet. Um die typischen Gefahrgutrisiken bewerten zu können, reicht hierbei der Vergleich mit dem Gesamt-Schadenerwartungswert alleine nicht. Dieser wird i. d. R. durch die relativ häufigen Szenarien mit geringem Schadenausmaß dominiert. Seltene Ereignisse die zu einem hohen Schadenausmaß führen, könnten so nicht berücksichtigt werden. Im Einzelnen werden die folgenden fünf Wirkungen bewertet:

- alle Wirkungen
- Brandwirkung
- Druck-/Brandwirkung
- Toxizität
- Druck

Die mit Hilfe des OECD/PIARC QRAM ermittelten Schadenerwartungswerte der einzelnen Szenarien (s. 5.3.1) werden dazu hinsichtlich ihrer Wirkung aufaddiert, normiert und mit dem zulässigen

<sup>18</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>19</sup> Bemessungsgeschwindigkeit für SV-Verkehr nach [HBS 2001] in Abhängigkeit der Neigung und Länge einer Steigungstrecke

<sup>20</sup> Die im Modell berechneten EV-Werte sind Absolutwerte und sind im Nachgang zu normieren.

Grenzwert verglichen. Die folgende Tabelle (Tab. 6) zeigt die zu bewertende Wirkung, die zugehörigen Szenarien sowie den zulässigen Grenzwert

EV-Wert Wirkung (normiert auf 1 km)	Zuordnung der OECD/PIARC QRAM - Szenarien (s. 5.3.1)	zulässiger EV-Vergleichswert (Schadenerwartungswert) [Tote/a-km]
alle Wirkungen	3 bis 13	$6,2 \cdot 10^{-3}$
Brandwirkung	4, 5	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Druck-/Brandwirkung	7, 8, 9	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Toxizität	6, 10, 11, 12	$4,0 \cdot 10^{-4}$
Druck	3, 13	$1,0 \cdot 10^{-6}$

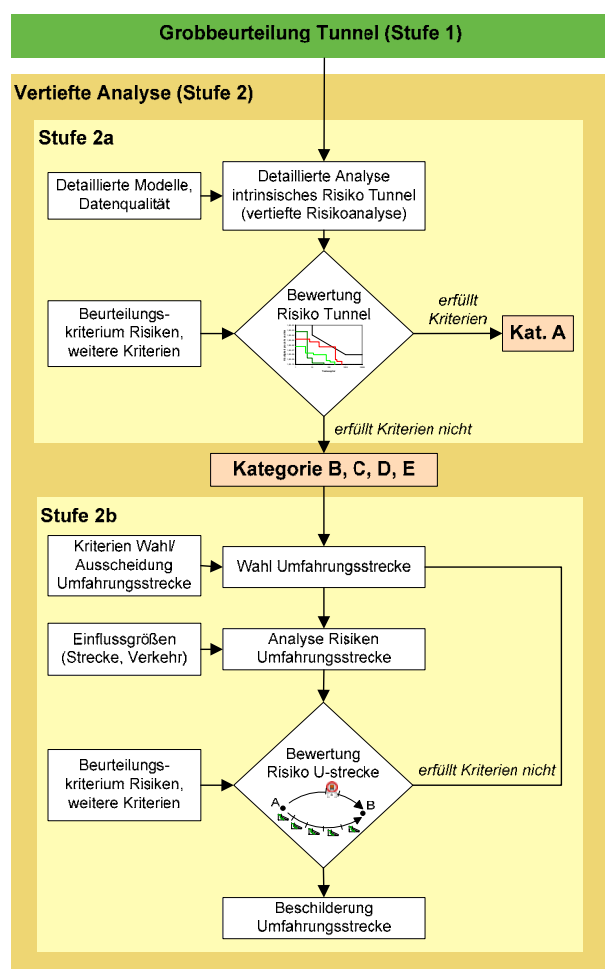
Tab. 6: Grenzwerte und Szenarien zur Bewertung des Risikos mit OECD/PIARC QRAM

Der zu bewertende Tunnel kann für alle Gefahrguttransporte freigegeben werden, wenn alle Grenzwerte nach Tab. 6 unterschritten werden. Darüber hinaus sind die allgemeinen Anwendungshinweise gem. Abschnitt 4.2 zu beachten. Wird mindestens ein Grenzwert überschritten, ist der Tunnel in einer vertieften Analyse gemäß Stufe 2 hinsichtlich der Freigabe bzw. etwaigen Beschränkung von Gefahrguttransporten zu untersuchen.

## 6 Stufe 2 – Vertiefte Analyse

Die Kategorisierung von Tunneln gemäß ADR 2007 im Rahmen der Stufe 2 des Verfahrens erfordert einerseits tiefgehende Kenntnisse über die Wirkungsmechanismen eines Gefahrstoffes nach dessen Freisetzung auf den menschlichen Organismus und andererseits detailliertes Wissen über das menschliche Verhalten und die Reaktion des Systems Tunnel im Gefahrenfall. Die hochdynamischen Prozesse und das individuelle menschliche Verhalten, erfordern im Zuge einer vertieften Analyse hochwertige Modelle, mit welchen sich diese komplexen Zusammenhänge beschreiben lassen. Eine detaillierte Beschreibung dieser Vorgänge ist üblicherweise unumgänglich, um eine Differenzierung in der Ergebnisdarstellung zu erhalten. Im Folgenden werden nach einem kurzen Überblick zum prinzipiellen Ablauf der vertiefenden Analyse die zur Kategorisierung von Tunneln erforderlichen Leitstoffe und Szenarien definiert sowie die Verfahren und Methoden zur Einstufung von Tunneln gemäß ADR erläutert.

## 6.1 Übersicht



**Bild 7:** Übersicht Vertiefte Analyse

Die vertiefte Analyse ist ebenfalls zweistufig aufgebaut (s. Bild 7). In der ersten Verfahrensstufe (Stufe 2a) erfolgt in Abhängigkeit von bestimmten Leitstoffen eine objektspezifische Quantisierung der Risiken, welche zur Kategorisierung mittels Vergleichsgrenzen bewertet werden. Wenn sich aufgrund der Risikobewertung die Notwendigkeit einer Beschränkung für einen Tunnel ergibt, so wird in einer zweiten Verfahrensstufe (Stufe 2b) überprüft, ob auf einer Umfahrroute das infolge der Verlagerung von Gefahrguttransporten entstehende zusätzliche Risiko akzeptiert werden kann.

Leitstoff	Maßgebliche Stoffeigenschaften <sup>22</sup>	Wichtigste Vertreter	Gefährdung von Personen durch ...
Benzin (Gefahrgutklasse 3)	Flüssig, leicht brennbar	Benzin und ähnliche Treibstoffe, diverse Lö- sungsmittel	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hitzeeinwirkung infolge Brand</li> <li>▪ Raucheinwirkung</li> </ul>
Propan (Gefahrgutklasse 2)	Gasförmig, leicht brennbar	Propan, Butan, andere Kohlenwasserstoffe, Vinylchlorid	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hitzeeinwirkung infolge Brand</li> <li>▪ Druckwirkung und Trümmerwurf infolge Explosion</li> </ul>
Chlor (Gefahrgutklasse 2)	Gasförmig, humantoxisch	Chlor, Chlorwasserstoff, Ammoniak	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Humantoxische Wirkungen bei Aufnahme über die Atemwege</li> </ul>
Trinitrotoluol (TNT, Gefahrgutklasse 1)	Fest, explosiv	TNT, Ammoniumnitrat, Ammoniumperchlorat	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Druckwirkung und Trümmerwurf infolge Detonation</li> </ul>

Tab. 7: Angaben zu den untersuchten Leitstoffen

## 6.2 Leitstoffe und Szenarien

### 6.2.1 Festlegung der Leitstoffe

Die Auswirkungen von Gefahrgutereignissen hängen maßgeblich von den Eigenschaften der freigesetzten Stoffe ab.

Im Rahmen von Risikoanalysen kann nicht das gesamte Spektrum aller möglichen Szenarien (Stoffe, Freisetzungsmengen) abgebildet werden. Üblicherweise werden deshalb die maßgeblichen Gefahrgutwirkungen Szenarien mit "typischen" Repräsentanten – so genannte Leitstoffe – abgebildet. Die aus Blickwinkel der (Personen-)Risiken relevanten Wirkungen gemäß der Kategorisierung nach ADR sind:

- Explosions-/Druckwirkung
- Toxizität
- Brandwirkung

Stellvertretend für die Gesamtheit aller hinsichtlich Personenschäden relevanten Gefahrgüter werden die vier Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und Trinitrotoluol (TNT) untersucht<sup>21</sup>. Die maßgeblichen Eigenschaften der vier Leitstoffe<sup>22</sup> sowie die zugehörigen Gefahrenpotentiale sind in Tab. 7 beschrieben. Stoffe mit vergleichbaren Eigenschaften werden unter dem jeweiligen Leitstoff erfasst (vgl.

Spalte "Wichtigste Vertreter"). Wenn im Folgenden von einem Leitstoff die Rede ist, so wird darunter stets die Gesamtheit aller vergleichbaren Stoffe verstanden. Erfahrungsgemäß kann mit diesen vier Leitstoffen das Gefahrgutspektrum hinreichend repräsentiert werden.

<sup>21</sup> Im Gegensatz zur Stufe 1b bzw. zum OECD/PIARC-Modell werden die Explosionswirkungen über den Leitstoff TNT und nicht über ein CO<sub>2</sub>-Szenario abgebildet.

<sup>22</sup> Die Angaben zum Aggregatzustand beziehen sich auf Umgebungsbedingungen (Normaldruck und -temperatur). Die beiden Gase Propan und Chlor werden in druckverflüssigter Form transportiert.

Leitstoff	Szen.-Nr.	Freisetzungsart	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. 8: Überblick der untersuchten Szenarien zur Abbildung der Kategorien gemäß ADR

### 6.2.2 Festlegung der Szenarien

Die Vielzahl der möglichen Freisetzungs- und Wirkungsabläufe von Freisetzungen wird mit einer beschränkten Zahl von Szenarien beschrieben. Die in der vorliegenden Methodik verwendeten Szenarien sind in Tab. 8 dargestellt.

Pro Leitstoff werden jeweils zwei unterschiedliche Szenariengrößen bzw. -abläufe betrachtet. Die Spezifikation der Leitstoffe im ADR legt in Abhängigkeit der transportierten Stoffmenge für jedes Szenario (bzw. für die dem Szenario gedanklich hinterlegte Fahrt) einen Tunnelbeschränkungscode

fest. Jeweils zwei Szenarien<sup>23</sup> bilden eine der im ADR definierten Hauptgefahren aus dem Gefahrguttransport ab:

- sehr große Explosion
- große Explosion
- umfangreiche Freisetzung giftiger Stoffe
- großer Brand

Die Risiken, welche sich aus dem zugelassenen Gefahrguttransport in einem Tunnel einer bestimmten Kategorie nach ADR ergeben, lassen sich durch Kombination der für die betreffende Kategorie maßgebenden Szenarien ermitteln. Das Vorgehen hierzu ist in Kapitel 6.1 erläutert.

Detaillierte Angaben zu den Szenarien und zugrundeliegende methodische Hintergründe sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

**6.2.3 Abschätzung der Häufigkeit von Freisetzungen**

Die Häufigkeit von Freisetzungen ist fallweise anhand von statistischen Daten zur Verkehrsleistung und zu Unfällen auf der betrachteten Strecke zu ermitteln.

Unfallraten und Raten von Unfällen mit Freisetzung

Zur Ermittlung von Unfallraten und Raten von Unfällen mit Freisetzung kann gemäß dem im Anhangbericht beispielhaft erläuterten Vorgehen verfahren werden.

Betreffend Verkehrsaufkommen werden für die Ermittlung der Risiken folgende Angaben benötigt:

- Fahrleistung des Gesamt- bzw. des Schwerverkehrs
- Anteile des Gefahrguttransportes am Schwerverkehr und Anteile der Leitstoffe am gesamten Gefahrguttransport
- Anzahl Unfälle und Freisetzungen sowie Anteil der relevanten Freisetzungen.

Aus diesen Angaben werden die Raten nach Leitstoff ermittelt (Unfälle bzw. Freisetzungen pro Jahr und Fahrzeug-Kilometer). In der Regel liegen hierzu keine streckenspezifischen Informationen vor, so dass auf statistische Mittelwerte abgestützt werden muss. Behelfsweise können deshalb die in Tab. 9 aufgeführten Werte verwendet werden. Die

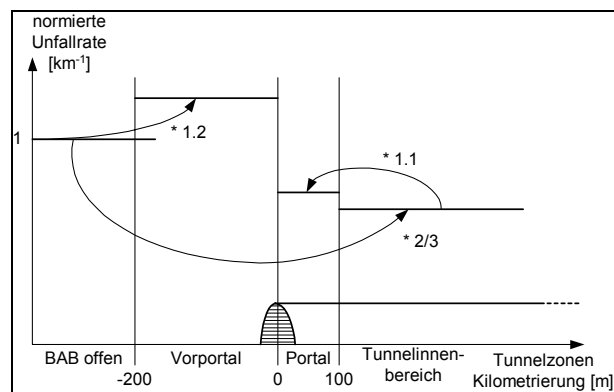
<sup>23</sup> Für die Ermittlung der Schadenausmaße für die einzelnen Szenarien wird jeweils die Freisetzung des jeweiligen Stoffes/Gefahrgutes untersucht, der als Leitstoff gewählt wurde, da für die Ausmaßermittlung die Berücksichtigung der stoffspezifischen Charakteristika erforderlich sind.

Herleitung der Werte ist dem Anhangbericht zu entnehmen.

	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 (Leitstoff TNT)	0,09	0,42	0,34
Gefahrgutklasse 2 (Leitstoffe Propan und Chlor)	0,03	0,15	0,12
Gefahrgutklasse 3 (Leitstoff Benzin)	0,46	2,67	2,18

**Tab. 9:** Hilfswerte für Raten von Unfällen mit Freisetzungen der betrachteten Gefahrgutklassen pro Straßentyp (offene Strecke)

Bei der Festlegung der Raten von Unfällen mit Freisetzung in Tunneln ist die unterschiedliche Verteilung von Unfällen und Freisetzungen von Gefahrgütern in Abhängigkeit vom Standort im Tunnel zu berücksichtigen. Angelehnt an [AMUN 1997] kann die Verteilung der Unfallrate basierend auf der Unfallrate für die offene Strecke festgelegt werden<sup>24</sup> (Bild 8). Die Unfallrate ist gemäß [AMUN 1997] im Tunnelinnern kleiner als auf der freien Strecke, ist im Portalbereich im Vergleich zur Tunnelmitte jedoch etwas erhöht. Die Unfallrate im Portalbereich vor dem Tunnel übersteigt die durchschnittlichen Werte für die offene Strecke.



**Bild 8:** Festlegung der Verteilung der Unfallraten innerhalb des Tunnels, normiert auf die Rate von offenen BAB-Abschnitten (in Anlehnung an [AMUN 1997])

<sup>24</sup> Diese Abschätzung ist nicht direkt auf andere Straßentypen übertragbar.

Die vorstehend aufgeführten Raten von Unfällen mit Freisetzung gelten für die auf den jeweiligen Straßentypen im Regelfall zugelassenen Höchstgeschwindigkeiten. Für andere Höchstgeschwindigkeiten ist die Rate von Unfällen mit Freisetzung entsprechend anzupassen. Es kann vereinfachend davon ausgegangen werden, dass sich die Raten von Unfällen mit Freisetzung im Bereich von 50 bis 100 km/h proportional zur Geschwindigkeit verhalten<sup>25</sup>.

### Häufigkeit von Freisetzungen

Ausgehend von den jeweils ermittelten Raten von Unfällen mit Freisetzung wird mit den streckenabschnittsbezogenen Parametern für Fahrleistung und Länge für jeden Leitstoff die Häufigkeit der relevanten Freisetzungen pro Jahr ermittelt.

Bei der Ermittlung der leitstoffspezifischen Fahrleistungen ist zu berücksichtigen, dass die Leitstoffe neben den namengebenden Stoffen weitere Vertreter aus derselben Gefahrgutklasse enthalten, sofern sie vergleichbare Stoffeigenschaften bzw. ähnliche Schadenwirkungen im Falle einer Freisetzung aufweisen und in wesentlicher Menge transportiert werden. Tab. 10 zeigt die wichtigsten Vertreter für die vier Leitstoffe.

Leitstoff	Wichtigste Vertreter
Benzin	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Benzin</li> <li>▪ Heizöl (bzw. Diesel)</li> </ul>
Propan	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Propan</li> <li>▪ Butan und weitere Vertreter</li> </ul>
Chlor	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Chlor</li> <li>▪ Ammoniak, Acrolein u. a.</li> </ul>
TNT	(diverse Explosivstoffe)

**Tab. 10:** Berücksichtigung weiterer Stoffe mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. möglichen Schadenwirkungen [PRA 1999]

Zur Ermittlung der leitstoffspezifischen Freisetzungshäufigkeiten werden die zu den einzelnen Leitstoffen gehörenden Gefahrgüter/Stoffe mit gleichartigen Wirkungen jeweils Korrekturfaktoren mit abgebildet bzw. die Zahl der leitstoffspezifischen Transporte entsprechend erhöht. Für die

Anwendung kann nach [THÜR 2000] von folgenden Werten ausgegangen werden (Tab. 11):

Leitstoff	Korrekturfaktor
Benzin	1,2
Propan	1,25
Chlor	2,3
TNT	1

**Tab. 11:** Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung weiterer Stoffe mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. möglichen Schadenwirkungen [PRA 1999]

## 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.

<sup>25</sup> Beispielsweise ist im Fall einer innerstädtischen Autobahn mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h die Freisetzungsrate für Autobahnen um einen Faktor 50/80 zu korrigieren (zugelassene Höchstgeschwindigkeit für Autobahnen im Regelfall 80 km/h).

### 6.3.1 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung im Tunnel

#### Grundsätzliches Vorgehen

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. 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
- Art der Freisetzung (spontan, kontinuierlich)
- Zündung (sofort, verzögert)
- Ereignisort (Einfahrtsbereich, Tunnelinnenstrecke)
- Zeitraum (Tag / Nacht)
- Verkehrszustand (freier Verkehr, Stau)
- Detektion erfolgreich (ja / nein)
- Sperreinrichtung aktiviert (ja / nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- Weitere Sicherheitssysteme<sup>26</sup> vorhanden und aktiviert (ja / nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- Fremddrettung

Für alle Leitstoffe ist fallweise festzulegen ob bzw. welche weiteren Verzweigungspunkte zu berücksichtigen sind.

Für jeden einzelnen Verzweigungspunkt ist dessen Eintrittswahrscheinlichkeit auf Grundlage bekannter Versagenswahrscheinlichkeiten, mittels Fehlerbäumen oder durch Experteneinschätzungen festzulegen. Die Verzweigungspunkte sind dabei abhängig von den jeweiligen Leitstoffen bzw. den möglichen leitstoffspezifischen Ereignisabläufen.

Im Folgenden werden für alle Leitstoffe die o. g. Verzweigungswahrscheinlichkeiten erläutert. Der Leitstoff Benzin dient hier als vollständiges Beispiel, bei den übrigen Leitstoffe wird nur auf die Besonderheiten eingegangen.

#### Leitstoff Benzin: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Mineralöl- bzw. Benzinfreisetzung und einem nachfolgenden Brand im Tunnel sind folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Art der Freisetzung: Je nach Art der Freisetzung (spontan oder kontinuierlich) ergeben sich hinsichtlich des zeitlichen Ablaufs des Ereignisses unterschiedliche Situationen. Bei einer spontanen Freisetzung werden sehr große Mengen innerhalb sehr kurzer Zeit freigesetzt. Dementsprechend bildet sich innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine Lache, welche zu einem nachfolgenden Brand führen kann.
- Zündung (sofort, verzögert): Je nach Zeitpunkt der Zündung bildet sich eine unterschiedliche Lachengröße aus.<sup>27</sup>
- Ereignisort: Der Ort des Ereignisses (Einfahrtsbereich, Tunnelinnenstrecke) hat Einfluss auf folgende risikorelevante Faktoren:
  - Unfallrate und Rate von Unfällen mit Freisetzung
  - Ausbreitung der Einwirkgrößen (Rauch, Temperatur, CO, etc.)
  - Fluchtmöglichkeiten und -verhalten der Verkehrsteilnehmer
- Zeitraum (Tag /Nacht)
- Verkehrszustand: Die verkehrliche Situation (freier Verkehr, Stau) hat u. a. Einfluss auf:
  - Personenexposition
  - Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Gefahrgutwirkung<sup>28</sup>

<sup>27</sup> Bei einer verzögerten Zündung kann sich die Lache über eine größere Distanz ausbreiten und somit die Zahl der potenziell betroffenen bzw. exponierten Personen erhöhen. Dieser Aspekt ist insbesondere für die Wirkung der Hitzestrahlung maßgebend, da die entsprechenden Wirkdistanzen von der Lachengröße abhängen. Für die Wirkungen der Rauchgase ist dieser Aspekt von untergeordneter Bedeutung.

<sup>28</sup> Im Falle eines Staus bzw. bei zähflüssigem Verkehr ist beispielsweise aufgrund der geringeren Fahrgeschwindigkeiten davon auszugehen, dass sowohl die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung als auch der Anteil spontaner Freisetzungen geringer ist.

<sup>26</sup> z. B.: Automatische Brandbekämpfungsanlage



- Branddetektion: Die erfolgreiche Branddetektion beeinflusst den zeitlichen Ablauf eines Ereignisses maßgeblich. Bei einer frühzeitigen Detektion des Brandes können das Lüftungssystem aktiviert und die Verkehrsteilnehmer gewarnt und damit das Schadenausmaß beeinflusst werden. Die bedingte Wahrscheinlichkeit einer frühzeitigen Detektion ist aufgrund der entsprechenden im Tunnel vorhandenen Infrastruktur abzuschätzen.
- Aktivierung Sperreinrichtungen: Eine frühzeitige Tunnelverschluss reduziert die Zahl der exponierten Personen und damit das potenzielle Schadenausmaß.
- Lüftungssystem: Im Gegensatz zur offenen Strecke kann es im Tunnel verstärkt auch infolge der entstehenden Rauchgase zu Todesopfern kommen. Ferner wird die Fluchtmöglichkeit der Tunnelbenutzer durch verminderte Sicht und die teilweise toxischen Gase stark beeinträchtigt. Das Lüftungssystem beeinflusst die Rauchgasausbreitung und damit das Schadenausmaß. Die Wirkung ist abhängig von Lüftungssystem, den Tunnelcharakteristika und der Brandleistung.
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert
- Schadenausmaßverteilung / Erhöhtes Ausmaß: Berücksichtigung von Ereignisabläufen mit erhöhtem Schadenausmaß. Z. B. Beteiligung von Reisebussen o. ä.
- Brandbekämpfung und Unterstützung der Selbstrettung durch Ereignisdienste: Die Bewältigung von Gefahrgutereignissen in Tunneln stellen erhöhte Anforderungen an die Ereignisdienste. Diese Aspekte sind bei der Abschätzung der Wirkung der Ereignisdienste zu berücksichtigen.

Die maßgeblichen Wirkarten des Leitstoffes Benzin im Tunnel sind:

- Lachenbrand mit Hitzestrahlung und Rauchentwicklung: I. d. R. geht die größte Gefahr von der Rauchentwicklung aus, da sich der Rauch und die toxisch wirkenden Rauchgase schnell über größere Distanzen im Tunnel ausbreiten können.
- Kanalisationsexplosion<sup>29</sup>: Im Entwässerungssystem können sich zündfähige, explosive Gasgemische bilden.

<sup>29</sup> Es ist jeweils spezifisch zu prüfen, ob diese Wirkart im spezifischen Fall maßgebend und gegebenenfalls zu berücksichtigen ist.

#### Leitstoff Propan: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Propan und einem nachfolgenden Brand im Tunnel sind abweichend vom Leitstoff Benzin folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Art der Freisetzung (spontan oder kontinuierlich): Bei einer spontanen Freisetzung ohne sofortige Zündung werden sehr große Gasmengen innerhalb sehr kurzer Zeit freigesetzt. Dementsprechend bildet sich innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine (je nach Zeitpunkt der Zündung) unterschiedlich große Gaswolke, welche zu einem nachfolgenden Brand führen kann.
- Lüftungssystem: Die Rauchgasentwicklungen sind für den Leitstoff Propan von untergeordneter Bedeutung. Der Einfluss der Lüftungssysteme ist primär aus Blickwinkel Sekundärbrände von Relevanz.
- *Zündung, Ereignisort, Zeitraum, Verkehrsstatus, Branddetektion, Aktivierung Sperreinrichtung, weitere Sicherheitssysteme, Schadenausmaßverteilung, Ereignisdienste s. Leitstoff Benzin*

Die maßgeblichen Wirkarten des Leitstoffes Propan im Tunnel sind:

- Feuerball /BLEVE: Spontane Freisetzung eines verflüssigten, brennbaren Gases aus einem Druckbehälter. Aufgrund der Verdämmungseffekte im Tunnel erhöht sich die Druckwirkung im Vergleich zu einer Freisetzung im Freien. Maßgebende Wirkung aber ist die Hitzeentwicklung. Im Tunnel führt der rasche Abbrand des Gases zudem zu einer Sauerstofflimitation.
- Gaswolkenbrand bzw. Gaswolkendeflagration oder -detonation: Entzündung und Abbrand einer brennbaren Gasgemischwolke. Durch die Verdämmung im Tunnel können Turbulenzen zu Flammengeschwindigkeiten führen, welche auch Druckwirkungen erzeugen können.
- Fackelbrand: 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.

#### Leitstoff Chlor: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Chlor sind abweichend vom Leitstoff Benzin im Tunnel folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Art der Freisetzung (spontan oder kontinuierlich): Die maßgebende Wirkdistanz der toxischen Gase hängt neben der Freisetzungsmenge auch von der Art der Freisetzung ab.
- Lüftungssystem: Erfahrungsgemäß liegen seitens der Tunnelbetreiber keine klaren Regelungen vor, ob bzw. wie bei einer Freisetzung das Lüftungssystem zum Einsatz gelangt. Es ist auch zu berücksichtigen, dass sich Chlor als Schwergas primär in Bodennähe ausbreitet.
- *Ereignisort, Zeitraum, Verkehrszustand, Branddetektion, Aktivierung Sperreinrichtung, weitere Sicherheitssysteme, Schadenausmaßverteilung, Ereignisdienste s. Leitstoff Benzin*

Die maßgeblichen Wirkart des Leitstoffes Chlor ist die toxische Wirkung bei der Aufnahme über die Atemwege.

#### Leitstoff TNT: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Feststoffexplosion (Leitstoff TNT) im Tunnel ist im Gegensatz zum Leitstoff Benzin im Ereignisablauf keine Differenzierung hinsichtlich der Art der Freisetzung (spontan / kontinuierlich) sowie der Aktivierung des Lüftungssystems erforderlich, da Explosionen keine Freisetzung vorangeht bzw. das Aktivieren der Lüftung keinen Einfluss auf das Schadensausmaß ausübt. Die maßgebliche Wirkart des Leitstoffes TNT liegt in der Druckwirkung inkl. Trümmerwurf, Splitterwirkung.

### 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 Gefahrstoffen 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>30</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 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  $n$  abgebildet werden können und durch weitere Sub-Modelle die Berechnung von

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

möglich sein.

Teil der Berechnung muss auch eine Darstellung der Eignung der verwendeten Rechenprogramme, bzw. Programmparameter (z. B. Zeitschritte) sein.

---

<sup>30</sup> Insbesondere bei verkehrstechnischen Maßnahmen, die auf eine Reduzierung von Eintrittshäufigkeiten abzielen, ist eine Verkehrsflusssimulation sinnvoll anzuwenden.

Insbesondere ist zu belegen, dass die Lösung eindeutig und dass das Verfahren stabil ist.

## 2. Wirkungsmodelle

Mit Hilfe von Wirkungsmodellen lassen sich in Abhängigkeit der Einwirkgrößen Druck, Temperatur und jeweiliger Schadstoffkonzentration personenbezogenen Letalitäten<sup>31</sup> ermitteln. Die Bestimmung von Letalitäten sollte auf Basis sogenannter Probit Funktionen<sup>32</sup> erfolgen.

## 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 2 Wirkungsmodelle) Selbstrettungsbereiche bzw. einzelpersonenbezogenen Schadensausmaße abzuleiten.

Flucht und Evakuierungsmodelle sollten soweit möglich zur realitätsnahen Abbildung wahrnehmungs- und verhaltenspsychologische Aspekte berücksichtigen.

## 4. Verkehrsflussmodelle (bei Bedarf)<sup>30</sup>

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 je nach Bedarf Einzelfahrzeuge in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen und Verkehrszusammensetzung abbildbar sein.

## 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 i. d. R. über seine gesamte Länge bzw. auch über eine maßgebenden Abschnitt mitsamt seinen sicherheitstechnischen

<sup>31</sup> Letalität: Tödlichkeit eines Giftstoffes

<sup>32</sup> Probit-Funktionen: Mittels dem aus der Statistik bekannten Probitmodell berechneter funktionaler Zusammenhang zwischen Schadstoffkonzentrationen und Einwirkdauer in Abhängigkeit der zu erwartender Letalität

Einrichtungen wie Ventilatoren, Absaugeinrichtungen, Detektionssysteme, automatische Löscheinrichtungen einschließlich deren Regelungen und Steuerungen abzubilden. Als Rand- und Anfangsbedingungen sind ferner die leitstoffspezifischen Freisetzungen sowie die Einflüsse aus Meteorologie vorzugeben. Des Weiteren sind szenarioabhängig die sich im Fahrraum befindlichen Fahrzeuge (Pkw, Lkw) mit abzubilden.

## 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.

## 6.3.3 Risikoermittlung

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 Tab. 2 lassen sich diese analog zu Kapitel 3.1.2 (Risikobewertung) entweder als Punktwert oder als HA-Diagramm darstellen.

## 6.3.4 Risikobewertung und Kategorisierung nach ADR

Die Bewertung der für jede Kategorie ermittelten Risiken erfolgt mit Hilfe der in Bild 9 dargestellten Vergleichsgeraden. Wird diese von einer Summenhäufigkeitslinie einer Kategorie überschritten, so ist der Tunnel für den Transport von Gefahrgütern dieser Kategorie zu beschränken. Mit der Verfahrensstufe Stufe 2b ist dann zu überprüfen, auf welcher Umfahungsstrecke der Transport von Gütern dieser Gefahrgutklasse akzeptiert werden kann.

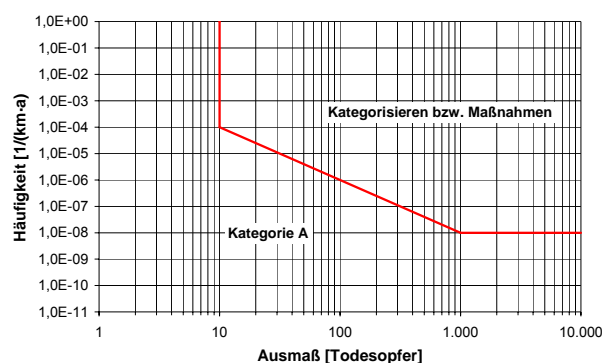


Bild 9: Bewertungskriterium Stufe 2a mit Vergleichsgerade

## 6.4 Stufe 2b - Umfahrungsstrecke

### 6.4.1 Übersicht

Zeigt die Analyse und Bewertung der Risiken gemäß dem vorliegenden Verfahren, dass eine Beschränkung für den zu untersuchenden Tunnel erforderlich ist, so ist nach den Vorgaben des ADR eine Umfahrungsstrecke für den entsprechenden Gefahrguttransport festzulegen. Die Wahl einer Umfahrungsstrecke erfolgt zweckmäßigerweise durch die zuständige Behörde des Landes. Nachfolgend ist zu überprüfen, ob infolge des zusätzlichen Gefahrguttransports infolge der Verlagerung für die Umfahrungsstrecke keine unverhältnismäßigen Risiken resultieren. Zu diesem Zweck ist eine Analyse und Bewertung der entsprechenden Risiken vorzunehmen. Das Vorgehen gliedert sich dabei in folgende Schritte:

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

### 6.4.2 Charakteristik der Umfahrungsstrecke

Analog zu den spezifischen Gegebenheiten jedes Tunnels weisen auch die Abschnitte einer Umfahrungsstrecke unterschiedliche Charakteristiken auf, welche die Höhe der Risiken beeinflussen. Um die zugehörigen Einflussgrößen in der Risikoanalyse zu berücksichtigen, ist die Umfahrungsstrecke in einzelne Untersuchungseinheiten / Streckenabschnitte zu unterteilen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese bezüglich der folgenden Einflussgrößen als hinreichend homogen angesehen werden können:

- Straßentyp (Unterscheidung Innerorts- bzw. Außerortsstraße und BAB etc.),
- Anzahl Fahrspuren,
- Kreuzungs- und Verzweigungsbereiche
- Unfallrate bzw. Rate von Unfällen mit Freisetzung,
- Bevölkerungsdichte im Wirkungsbereich freigesetzter Gefahrgüter,<sup>33</sup>
- Besondere Objekte wie beispielsweise Schulen, Altersheime, Spitäler, Publikumsanlagen etc.
- Umgebungscharakteristika, welche die Ausbreitung und Wirkung freigesetzter Gefahrgüter (primär Flüssigkeiten und Gase) beeinflussen können: z.B. Topografie, Lärmschutzwände etc.
- weitere Aspekte, welche hinsichtlich Ereignishäufigkeit oder Schadensmaß von Gefahrgutereignissen relevant sind.
- Sensible Anlagen (Tankstellen, Lager, etc.)

Mittels dieser Kriterien ist die Umfahrungsstrecke in einzelne Untersuchungseinheiten zu unterteilen.

Das grundsätzliche Vorgehen zur Ermittlung der Risiken erfolgt analog zum Vorgehen für die Tunnelstrecken. Nachfolgend wird das Vorgehen dargestellt und insbesondere die spezifischen Unterschiede für die Risiken im Freifeld erörtert.

### 6.4.3 Ablaufmodellierung und Häufigkeitsermittlung Freifeld

Das grundsätzliche Vorgehen erfolgt analog zu demjenigen für Tunnelstrecken und gliedert sich nach den vier Leitstoffen Benzin, Propan, Chlor und TNT.

Für die Ermittlung der Häufigkeit einer Freisetzung auf offener Strecke ist das Vorgehen entsprechend Kapitel 6.2.3 relevant. Fallweise zu berücksichtigen ist der Umstand, dass in Kreuzungs- und Verzweigungsbereichen oder auf Streckenabschnitten mit hoher Kurvigkeit oder Gefälle die Unfallraten bzw. Raten von Unfällen mit Freisetzung von den Mittelwerten abweichen können. Dies ist bei der Ermittlung der leitstoffspezifischen Freisetzungshäufigkeiten pro Streckenabschnitt/Untersuchungseinheit bzw. als Grundlage für eine geeignete Festlegung eines zu untersuchenden Streckenabschnitts zu berücksichtigen.<sup>34</sup>

<sup>33</sup> Dabei ist die unterschiedliche Wirkdistanz der Leitstoffe sowie der jeweiligen Wirkungen zu berücksichtigen.

<sup>34</sup> Für die praktische Umsetzung wird empfohlen, die Mittelwerte in Kapitel 6.2.3 über Korrekturfaktoren anzupassen.

Leitstoff Benzin: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Mineralöl- bzw. Benzinfreisetzung sind im Regelfall für offene Strecken folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Art der Freisetzung (spontane oder kontinuierliche Freisetzung)
- Zündung (ja/nein)
- Zeitpunkt der Zündung: Sofortige bzw. verzögerte Zündung
- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag/Nacht)
- Brandbekämpfung und Unterstützung der Selbstrettung durch Ereignisdienste (ja/nein)
- Schadenausmaßverteilung<sup>35</sup>

Es ist zudem im Einzelfall zu prüfen, ob weitere Aspekte für die jeweilige Umfahrungsstrecke im Hinblick auf die resultierenden Risiken einen signifikanten Einfluss haben (wie beispielsweise die Verteilung des Verkehrsaufkommens: Stau / fließender Verkehr, die Berücksichtigung von zeitabhängig stark schwankenden Personenexpositionen oder das Eindringen von freigesetztem Gefahrgut in das Kanalisationssystem o. ä.)

Die maßgeblichen Wirkarten des Leitstoffes Benzin sind:

- Lachenbrand
- Kanalisationsexplosion<sup>36</sup>

Leitstoff Propan: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Propan sind im Regelfall für offene Strecken folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Art der Freisetzung (spontane oder kontinuierliche Freisetzung)<sup>37</sup>
- Zündung (ja/nein)
- Zeitpunkt der Zündung: Sofortige bzw. verzögerte Zündung
- Meteorologische Verhältnisse: Wind / Windstille
- Verteilung der Windrichtungen
- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag/Nacht)
- Evakuierung, Brandbekämpfung und Unterstützung der Selbstrettung durch Ereignisdienste (ja/nein)
- Schadenausmaßverteilung

Analog zum Leitstoff Benzin ist spezifisch zu prüfen, ob aufgrund der örtlichen Gegebenheiten weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind.

Die maßgeblichen Wirkarten des Leitstoffes Propan sind:

- Feuerball / BLEVE: Spontane Freisetzung eines verflüssigten, brennbaren Gases aus einem Druckbehälter unter Bildung eines (im Freien aufsteigenden) Feuerballs
- Gaswolkenbrand bzw. Gaswolkendeflagration oder -detonation: Entzündung und Abbrand einer brennbaren Gasgemischwolke. Der Abbrand geschieht in der Regel nicht explosionsartig, erzeugt also primär Wärmestrahlung und i. A. keine maßgeblichen Druckwirkungen. In Fällen mit Verdämmung (z. B. eng stehende Bauten) können Turbulenzen zu Flammengeschwindigkeiten führen, welche Druckwirkungen erzeugen können (Gaswolkenexplosion).
- Fackelbrand: 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.

Leitstoff Chlor: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Freisetzung des Leitstoffes Chlor sind im Regelfall für offene Strecken folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

<sup>35</sup> Dabei werden Szenarien mit erhöhtem Schadenausmaß mit berücksichtigt. Beispielsweise die Möglichkeit, dass sich zum Zeitpunkt des Ereignisses ein Reisebus im Gefahrenbereich befindet.

<sup>36</sup> Es ist jeweils spezifisch zu prüfen, ob diese Wirkart im spezifischen Fall zu berücksichtigen ist oder nicht.

<sup>37</sup> Die Freisetzung druckverflüssigter Gase (Leitstoffe Propan und Chlor) kann in Gas- oder Flüssigphase oder als Gemisch erfolgen.

- Art der Freisetzung (spontane oder kontinuierliche Freisetzung)
- Meteorologische Verhältnisse: Wind / Windstille
- Verteilung der Windrichtungen
- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag/Nacht)
- Evakuierung / Ausmaßminderung durch Ereignisdienste
- Schadenausmaßverteilung

Wie für die anderen Leitstoffe ist spezifisch zu prüfen, ob aufgrund der örtlichen Gegebenheiten weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind.

Maßgebliche Wirkart des Leitstoffes Chlor ist die Toxizität.

#### Leitstoff TNT: Einflussfaktoren und Ereignisbäume

Für die Berechnung der Ausmaßverteilung einer Explosion von TNT sind im Regelfall für offene Strecken folgende Einflussgrößen im Ereignisbaum zu berücksichtigen:

- Zeitpunkt des Ereignisses (Tag/Nacht)
- Evakuierung / Ausmaßminderung durch Ereignisdienste
- Schadenausmaßverteilung

Es ist darüber hinaus spezifisch zu prüfen, ob aufgrund der örtlichen Gegebenheiten weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen sind.

Maßgebliche Wirkart des Leitstoffes TNT ist die Druckwirkung (inkl. Trümmerwurf, Splitterwirkung).

### **6.4.4 Ausmaßermittlung Freifeld**

#### Leitstoff Benzin

Für die Ausmaßermittlung für den Leitstoff Benzin im Freifeld sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Lachenbildung / Lachengröße: Die den jeweiligen Freisetzungsmengen entsprechenden Lachengrößen sowie die zugehörigen Wirkungsradien und Letalitäten infolge der Wärmestrahlung in Abhängigkeit des Abstandes können mit verschiedenen Modellen oder Abschätzungsformeln bestimmt werden. Dabei sind die Schutzwirkung von Fahrzeug- und Gebäudehüllen u.ä. zu berücksichtigen. Weist ein Streckenabschnitt ein erhebliches Gefälle auf, so wird empfohlen die ermittelte Lachengröße mittels eines Korrekturfaktors anzupassen.
- Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer und Anwohner
- Ausmaßminderung durch Ereignisdienste: Bei einer rechtzeitigen Intervention und Brandbekämpfung durch Ereignisdienste können eine weitere Brandentwicklung verhindert, Personen aus dem Gefahrenbereich evakuiert und verletzte Personen gerettet werden. Die quantitative Abschätzung dieser Wirkung basiert i. d. R. auf Annahmen.

#### Leitstoff Propan

Für die Ausmaßermittlung für den Leitstoff Propan im Freifeld sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Ausbreitung/Wirkungsradien: Die Ausbreitung, die entsprechenden Wirkungsbereiche und Letalitäten können z. B. nach [TNO 1997] bestimmt werden. Eine wichtige ortsspezifische Einflussgröße ist die Umgebungstopographie. Die Ausbreitung schwerer Gase (im Falle von Propan vor einer möglichen verzögerten Zündung) wird dadurch stark beeinflusst.
- Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer und Anwohner
- Schutzwirkung durch Fahrzeug- und Gebäudehüllen
- Ausmaßminderung durch Ereignisdienste: Bei einer rechtzeitigen Intervention und Brandbekämpfung durch Ereignisdienste können eine weitere Brandentwicklung verhindert, Personen aus dem Gefahrenbereich evakuiert und verletzte Personen gerettet werden. Die quantitative Abschätzung dieser Wirkung basiert i. d. R. auf Annahmen.

#### Leitstoff Chlor

Für die Ausmaßermittlung für den Leitstoff Chlor im Freifeld sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Ausbreitung/Wirkungsradien: Die Ausbreitung, die entsprechenden Wirkungsbereiche und Letalitäten können ebenfalls z. B. nach [TNO 1997] bestimmt werden. Zu berücksichtigen ist wie beim Leitstoff Propan die Umgebungstopographie. Die Ausbreitung schwerer Gase wird dadurch stark beeinflusst. Generell sind die Bereiche am stärksten gefährdet, die relativ zum Freisetzungsort tiefer liegen, während die Risiken für Personen in erhöht liegenden Bereichen deutlich kleiner sind.
- Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer und Anwohner
- Schutzwirkung durch Fahrzeug- und Gebäudehüllen
- Ausmaßminderung durch Ereignisdienste: Die quantitative Abschätzung dieser Wirkung basiert auf Annahmen. In der Regel sind die Möglichkeiten der Ereignisdienste bei toxischen gasen oder luftgängigen Flüssigkeiten beschränkt (verhältnismäßig großer Zeitbedarf für Selbstschutzmaßnahmen etc.).

#### Leitstoff TNT

Für die Ausmaßermittlung für den Leitstoff TNT im Freifeld sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Wirkungsradien: Die Wirkungsbereiche und Letalitäten der Druckwirkungen können beispielsweise nach [LS 2000] abgeschätzt werden
- Fluchtverhalten der Verkehrsteilnehmer und Anwohner.
- Schutzwirkung durch Fahrzeug- und Gebäudehüllen
- Ausmaßminderung durch Ereignisdienste

#### 6.4.5 Risikoermittlung

Die Ermittlung der Risiken erfolgt analog zum Vorgehen für die Tunnelstrecke.

#### 6.4.6 Risikobewertung

Die Bewertung der Risiken erfolgt – mit Ausnahme des Aspektes der Kategorisierung – analog zum Bewertungsverfahren wie es für Tunnel durchzuführen ist. (vgl. Kapitel 6.3.4). Dabei werden wiederum dieselben Bewertungskriterien im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm angesetzt.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die genannten Bewertungskriterien nur im vorliegenden Kontext anzuwenden sind.

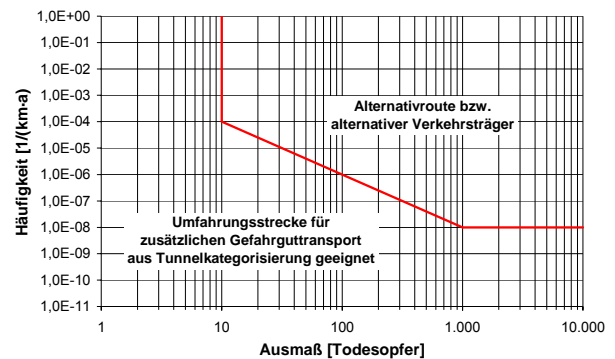


Bild 10: Bewertungskriterium Stufe 2b mit Vergleichsgerade

Für jeden untersuchten Streckenabschnitt sind dabei die Risiken infolge des zusätzlichen Gefahrgutverkehrs<sup>38</sup> über die Umfahrungsstrecke zu bewerten<sup>39</sup>. Maßgebend für die Gesamtbewertung der Umfahrungsstrecke ist jeweils der Streckenabschnitt mit den höchsten Risiken.

In die Bewertung können bei Bedarf – insbesondere bei erhöhten Risiken (unterhalb der Vergleichsgerade) – auch zusätzliche weitere Kriterien, die über die zur Risikobewertung im engeren Sinn berücksichtigten Parameter hinausgehen, einbezogen werden. Dies sind unter anderem:

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

Zeigt die Analyse der Umfahrungsstrecke, dass die gewählte Route aus Blickwinkel der Risiken nicht

<sup>38</sup> Für die Risikoanalyse sind die bereits bestehende Belastung mit Gefahrguttransporten sowie die zusätzlichen Transporte infolge der Beschränkung zu berücksichtigen.

<sup>39</sup> Erfahrungsgemäß lassen sich bereits im Zuge der Gliederung der Umfahrungsstrecke auf Basis einer Analyse der Einflussgrößen diejenigen Untersuchungseinheiten ermitteln, für welche tendenziell vergleichsweise höhere Risiken zu erwarten sind. So sind nicht in allen Fällen für sämtliche Streckenabschnitte quantitative Risikobewertungen erforderlich.

geeignet ist, so sollen eine andere Umfahrungsstrecke festgelegt und die entsprechenden streckenspezifischen Risiken ermittelt und bewertet werden. Ebenso kann gemäß der Kombination aus ADR und EG-Tunnelrichtlinie [EG 2004] eine Verlagerung der Gefahrguttransporte auf alternative Verkehrsträger vorgenommen werden. Für den Ausnahmefall, dass weder alternative Umfahrungsstrecken noch alternative Verkehrsträger vorhanden sind, ist ggf. eine Rückverlegung auf den Tunnel möglich.

## 7 Ausblick und Entwicklung

Mit dem vorliegenden Verfahren ist eine Umsetzung von ADR 2007 und RABT 2006 zur Kategorisierung von Straßentunneln für Gefahrguttransporte risikobasiert und einheitlich möglich. Die Rahmenbedingungen für die einzelnen Stufen wurden aus bisherigen Untersuchungen und Erfahrungen mit entsprechenden Modellen entwickelt.

Die Grenzwerte in den Stufen 1a (Kenngrößen für Tunnel- und Streckencharakteristik), 1b (Schadenerwartungswerte) und 2 (Vergleichslinie) sind auf Basis von Beispielrechnungen innerhalb des Forschungsprojektes und Gefahrgutrisikoanalysen zurückliegender Projekte kalibriert worden. Diese Datenbasis ist relativ begrenzt, verfügt aber über überproportional viele Tunnel, die hinsichtlich Gefahrgutrisiken in Deutschland außergewöhnlich sind.

Das Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln ist daher als dynamischer Prozess zu sehen, der mit zunehmender Erfahrung und vergrößerter Datenbasis zu einer Fortschreibung und damit Anpassung führen kann. Dies betrifft insbesondere die festgelegten Grenzwerte in den Stufen 1b und 2 sowie eine Überprüfung der Kenngrößen in Stufe 1a.

Es wird empfohlen dazu bei der beginnenden Umsetzung alle Ergebnisse entsprechend zu sammeln und die Erfahrungen zur Fortschreibung zu nutzen.



## 8 Fazit und Zusammenfassung

Die geltenden Vorschriften und Richtlinien für Tunnel (EG-Tunnelrichtlinien und RABT) sowie das Übereinkommen zur Beförderung gefährlicher Güter (ADR) sehen eine risikobasierte Kategorisierung von Straßentunneln hinsichtlich der Beschränkung von Gefahrguttransporten vor. Dazu sind die Tunnel in die Kategorien A (für alle Gefahrguttransporte zugelassen) bis E (für alle Gefahrguttransporte gesperrt) einzuordnen.

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojektes wurde zu dieser Kategorisierung ein Verfahren entwickelt. Das Verfahren ist zweistufig in eine Grobanalyse und eine vertiefte Analyse aufgebaut, die in sich geschlossen und im Ablauf konsistent sind. Beginnend mit einer Grobanalyse, die durch die Verwaltung selbst durchgeführt werden kann, wird ein Großteil der Deutschen Straßentunnel der Kategorie A zugeordnet werden können. Dies geschieht in der Stufe 1a durch ein Kenngrößenverfahren als Grobselektion und in der Stufe 1b risikobasiert mit Hilfe des OECD/PIARC QRAM. Können die zu untersuchenden Tunnel in der Stufe 1 nicht der Kategorie A zugeordnet werden, ist in der zweiten Stufe zunächst das Gefahrgutrisiko für den Tunnel (Stufe 2a) mit vertiefenden Modellen und genaueren spezifisch erhobenen Eingangsdaten zu bestimmen. Liegt dieses Risiko unterhalb einer für dieses Verfahren definierten Vergleichskurve, so kann der Tunnel für den gesamten Gefahrguttransport frei gegeben werden. Ergibt sich ein höheres Risiko, muss der Tunnel kategorisiert werden. Dazu ist der Tunnel für Gefahrgüter mit den entsprechenden Tunnelbeschränkungscode gemäß ADR so zu beschränken, damit die Risikokurve des beschränkten Tunnels unterhalb der Grenzkurve liegt.

Im Falle einer Beschränkung des Tunnels ist der maßgebende Abschnitt einer festgelegten Umfahrungsstrecke in der Stufe 2b mit der gleichen Vergleichskurve dahingehend zu bewerten, ob sie den gesamten Gefahrgutverkehr aufnehmen kann. Ist dies möglich, so werden sowohl der Tunnel als auch die Umfahrungsstrecke entsprechend beschildert. Kann die Umfahrungsstrecke den zusätzlichen Verkehr nicht aufnehmen, ist eine Alternativstrecke zu untersuchen eine Umleitung auf alternative Verkehrsträger vorzunehmen. Für den Ausnahmefall, dass weder alternative Umfahrungsstrecken noch alternative Verkehrsträger vorhanden sind, ist ggf. eine Rückverlegung auf den Tunnel möglich.

Für die einzelnen Stufen und Teilstufen wurden die Randbedingungen hergeleitet und definiert. Anforderungen an Modelle, Daten und Anwendung

wurde so beschrieben, dass eine einheitliche Umsetzung möglich ist. Dazu dienten insbesondere Erfahrungen aus durchgeführten Gefahrgutrisikolanalysen der letzten Jahre sowie eine Sensitivitätsanalyse des OECD/PIARC QRAM hinsichtlich der Eignung im Verfahren.

Das entwickelte Verfahren ist ein Hilfsmittel für die Kategorisierung anzuwenden. Dazu sind wegen der komplexen Zusammenhänge bei der Risikobewertung entsprechende Fachkenntnisse des eingesetzten Personals unabdingbar, da projektspezifische Randbedingungen entsprechend beurteilt werden müssen und für die Bewertung entscheidend sind.

Mit einer Kategorisierung kann es m. E. vorkommen, dass Gefahrguttransporte nicht durch den Tunnel geführt werden dürfen, obwohl sie hinsichtlich des ermittelten Risikos eine untergeordnete Bedeutung haben. Dies liegt an dem Ansatz des ADR, den Tunnelbeschränkungscode für einzelne Gefahrgüter nach dem Schadenausmaß im Ereignisfall und nicht risikobasiert unter Berücksichtigung von Ausmaß und Häufigkeit eines Ereignisses zuzuordnen.

Die in der Methodik festgelegten Grenzwerte bzw. Vergleichskriterien sind auf Grundlage einer relativ geringen Datenbasis hergeleitet und festgelegt worden. Die mit der Einführung und Umsetzung des Verfahrens erreichten Erfahrungen sollten daher im weiteren Prozess wieder in das Verfahren einfließen und zur Fortschreibung dienen. Sinnvoll ist eine Revision nach der Einführungsphase und ggf. nach weiteren 5 - 8 Jahren.

## 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, 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