HBI Haerter

Auftraggeber
Client
Client
Cliente
Cliente

Landesbetrieb Straßenbau NRW

Objekt- / Projektname
Object / Project Name
Nom d'Objet / de Projet
Nome dell'oggetto / del Progetto
Nombre Objeto/Proyecto

A1 Ausbau zwischen AK Leverkusen-West und AK Leverkusen

Berichtstitel
Report Title
Titre de Rapport
Titolo di Rapporto
Titulo di Reporte

Anlage T13.2 - Kategorisierung von Gefahrguttransporten nach ADR 2007 in Stufe 2a

Verfasser
Author
Auteur
Autore
Autor

Simon Schneider

Datum / Version
Date / Version
Date / Version
Data / Versione
Fecha / Versión

2015-10-06 / 1.2

HBI-Auftragsnummer
HBI Project Number
HBI Numéro de Projet
HBI Numero de Progetto
HBI Numéro de Proyecto

3015201.04.01.04

HBI-Berichtsnummer
HBI Report Number
HBI Numéro de Rapport
HBI Numero de Rapporto
HBI Numéro de Reporte

15-201-002

HBI Haerter Beratende Ingenieure
HBI Haerter Consulting Engineers
HBI Haerter Ingénieurs Conseils
HBI Haerter Ingegneri Consulenti
HBI Haerter Ingenieros Consultores

HBI Haerter GmbH
Friedrich-Ebert-Straße 25
89522 Heidenheim, Deutschland
Tel. +49 7321 98 23-10
info.hdh@hbi.eu

ISO 9001:2008 Certified

www.hbi.eu

Impressum

Volltitel	Anlage T13.2 - Kategorisierung von Gefahrguttransporten nach ADR 2007 in Stufe 2a
Kurztitel	ADR-Kategorisierung, Stufe 2a
Auftraggeber	Landesbetrieb Straßenbau NRW
Verfasser	Simon Schneider
Projekt- / Objektname	A1 Ausbau zwischen AK Leverkusen-West und AK Leverkusen
Auftragsnummer	3015201.04.01.04
Berichtnummer	15-201-002
Berichtdatum	2015-10-06
Version	1.2
Verteiler	1x Landesbetrieb Straßenbau NRW 1x HBI

	Autor	*Prüfer*	*Freigabe*	*Vers.*	*Änderungen*
Unterschrift oder Kürzel	SIS	JKO	-	1.0	Erst-Fassung
Name	Simon Schneider	Jens König	-		
Datum	2015-05-08	2015-05-22	-		
Unterschrift oder Kürzel	SIS	JKO	-	1.1	Redaktionelle Änderungen
Name	Simon Schneider	Jens König	-		
Datum	2015-08-18	2015-08-19	-		
Unterschrift oder Kürzel	SIS	JKO	-	1.2	Redaktionelle Änderungen
Name	Simon Schneider	Jens König	-		
Datum	2015-10-06	2015-10-06	-		

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Zusammenfassung

Die vorliegende Anlage T13.2 der Machbarkeitsstudie „Zulässigkeit Gefahrguttransporte – Tunnel Leverkusen“ [3] stellt das Vorgehen und die Ergebnisse der Kategorisierung des Tunnels Leverkusen für den Gefahrguttransport im Zuge der BAB 1 dar. Es wurde das „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“ [1] in Stufe 2a, aufbauend auf der Untersuchung der Stufe 1b [4], angewendet.

Der Tunnel Leverkusen erfüllt nicht die Anforderungen der Kategorie A und kann damit für den uneingeschränkten Transport von gefährlichen Gütern nicht empfohlen werden. Die Beurteilung bezieht sich auf ein Schadensausmaß, dem der Schadensindikator Todesopfer zugrunde liegt.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Inhaltsverzeichnis

Impressum **2**
Zusammenfassung **3**
Inhaltsverzeichnis **4**
1 Einleitung und Aufgabenstellung **6**
2 Angaben zum Projekt **7**
2.1 Tunneldaten & Betriebs-/Sicherheitstechnische Ausstattung 7
2.2 Verkehrsdaten 7
2.3 Meteorologie 7
3 Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007 ..... **8**
3.1 Vorgehen 8
3.2 Festlegung der Leitstoffe 10
3.3 Festlegung der Szenarien 11
3.4 Ermittlung der Häufigkeiten 11
3.4.1 Häufigkeiten und Freisetzungen 11
3.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Benzin 13
3.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Propan 13
3.4.3 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Chlor 14
3.4.4 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff TNT 15
3.5 Ausbreitungs- und Strömungsberechnungen 16
3.5.1 Grundlagen 3-dimensionale Modellierung 16
3.5.2 Tunnelmodell 16
3.5.3 Ausbreitungsmodellierung Benzin 17
3.5.4 Ausbreitungsmodellierung Propan 18
3.5.5 Ausbreitungsmodellierung Chlor und TNT 18
3.6 Wirk- und Entfluchtungsmodellierung 19
3.6.1 Grundlagen 19
3.6.2 Einflüsse auf das Schadensausmaß 20
4 Ergebnisse **21**
4.1 Ausbreitung und Schadensausmaß Benzin 21
4.1.1 Szenario 1 – 200 MW-Benzinbrand 21
4.1.2 Szenario 2 – 800 MW Benzinbrand 22
4.2 Ausbreitung und Schadensausmaß Chlor 24
4.2.1 Szenario 1 – Chlor 50 kg 24
4.2.2 Szenario 2 – Chlor 4 t 25
4.3 Risikoermittlung 26
4.3.1 Allgemeines 26
4.3.2 Risikoermittlung Benzin 27
4.3.3 Risikoermittlung Propan 27
4.3.4 Risikoermittlung Chlor 28
4.3.5 Risikoermittlung TNT 29
4.3.6 Summenhäufigkeitskurve über alle Leitstoffe 30
5 Empfehlungen **32**

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

6 Quellenverzeichnis 33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland [1] 7
Tabelle 3.1: Tunnelkategorien [1] 10
Tabelle 3.2: Definition Leitstoffe [1] 10
Tabelle 3.3: Definition Szenarien [1] 11
Tabelle 3.4: Hilfswerte für Raten von Unfällen mit Freisetzungen (offene Strecke) [1] 12
Tabelle 3.5: Transportanteil je Leitstoff [2] 12
Tabelle 3.6: Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung weiterer Stoffe [1] 12
Tabelle 3.7: Zusammenfassung der verwendeten Lachengröße und Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit des Szenarios 17
Tabelle 4.1: Temperaturausbreitung eines 200 MW-Benzinbrandes 21
Tabelle 4.2: Sichtweite eines 200 MW-Benzinbrandes 22
Tabelle 4.3: Temperaturausbreitung eines 800 MW-Benzinbrandes 23
Tabelle 4.4: Sichtweite eines 800 MW-Benzinbrandes 24
Tabelle 4.5: Chlorkonzentration bei 50 kg Chlorfreisetzung 25
Tabelle 4.6: Chlorkonzentration bei 4 t Chlorfreisetzung 26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Beispiel eines Ereignisbaumes [2] 8
Abbildung 3.2: Beispiel eines Summenhäufigkeitsdiagramms [1] 9
Abbildung 3.3: Bewertungskriterium Stufe 2a mit Vergleichsgeraden [1] 9
Abbildung 3.4: Festlegung der Verteilung der Unfallraten innerhalb des Tunnels [1] 12
Abbildung 4.1: Summenkurven Benzin 27
Abbildung 4.2: Summenkurven Propan 28
Abbildung 4.3: Summenkurven Chlor 29
Abbildung 4.4: Summenkurven TNT 30
Abbildung 4.5: Summenkurven aller Leitstoffe 31
Abbildung 5.1: Summenkurve aller Leitstoffe der Kategorie E 32

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Aufgrund des hohen Schadenspotenzials durch Freisetzungen von Gefahrgütern waren neue regulative Forderungen zur Beurteilung gefährlicher Güter auf der Straße notwendig. Unter Berücksichtigung der EG-Tunnelrichtlinie und der RABT 2006 wurde das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) im Jahr 2007 modifiziert. Darin ist eine einheitliche Regelung zur Kategorisierung von Tunneln hinsichtlich Gefahrguttransporten enthalten.

Im Auftrag des Landesbetriebs Straßenbau NRW soll eine mögliche Tunnelvariante zum Ausbau der BAB 1 zwischen dem AK Leverkusen-West und dem AK Leverkusen nach ADR mittels eines Verfahrens entsprechend untersucht werden. Der im Richtungsverkehr befahrene Tunnel stellt eine Überdeckelung eines Abschnittes der BAB 1 dar und besteht aus zwei Röhren mit einer Länge von ca. 970 m. Die Röhren weisen einen Sonderquerschnitt von 6 Fahrstreifen auf, der teilweise durch eine Trennwand in Fahrbahnen mit 2 bzw. 4 Fahrstreifen untergliedert wird. Die mehrspurigen Röhren weisen mittlere Steigungen von -1,34% und 1,42% auf.

Das Verfahren zur Kategorisierung von Gefahrguttransporten nach ADR 2007 [1] ist ein zweistufiges Verfahren. In einer Grobbeurteilung (Stufe 1) wird entschieden, ob Gefahrguttransporte allgemein zugelassen werden können oder ob eine vertiefte Analyse (Stufe 2) notwendig ist.

Die Stufe 1 wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie zur Zulässigkeit von Gefahrguttransporten im Tunnel Leverkusen untersucht (siehe [3], [4]). Im Zuge dessen wurde der Tunnel Leverkusen nach einem Kenngrößenverfahren und mittels einer quantitativen Risikoanalyse unter Anwendung des OECD-PIARC-Modells [5] beurteilt. Nach Anwendung der Freisetzungs- und Ausbreitungsmodelle von Gefahrgutstoffen, die durch die zu Grunde liegenden QRAM-Programme abgebildet werden, wurden die Grenzwerte zur Vergabe der Kategorie A überschritten, sodass der Tunnel nach den Berechnungsergebnissen und Vorgabe des Verfahrens in Stufe 2 vertieft zu untersuchen ist.

Als Schadensausmaß werden ausschließlich Personenschäden herangezogen und keine Umwelt- und Sachschäden. Es werden keine baulichen, technischen, organisatorischen Maßnahmen erarbeitet.

In dem Bericht wird ein Überblick über das allgemeine Verfahren gegeben. Es werden die Grundlagen und die Durchführung der vertieften Analyse für Tunnel beschrieben, und deren Ergebnisse dargestellt.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

2 Angaben zum Projekt

Mittels der Angaben zur Tunnelgeometrie, zur Lüftung und zum Entwässerungssystem lassen sich die Einflussfaktoren auf die Rauch- und Gasausbreitung, sowie eventuelle Flüssigkeitsansammlungen bestimmen. Die Position der Notausgänge geben Aufschluss über die Fluchtweglängen und haben somit Einfluss auf die Ausmaßabschätzung.

Die notwendigen Eingangsdaten nach [1] sind:

- Lageplan, Höhenplan, Querschnitte
- Detaillierte Verkehrsdaten mit Verkehrszusammensetzung, Tages- bzw. Jahresganglinien für DTV, SV, GG, Gefahrgutzusammensetzung, Unfallstatistik
- Bestand der betriebstechnischen Ausstattung

2.1 Tunneldaten & Betriebs-/Sicherheitstechnische Ausstattung

Eine Zusammenstellung der Tunneldaten bzw. der betriebs-/ sicherheitstechnischen Ausstattung ist in Kapitel 2.3 und Kapitel 3 und 4 der Machbarkeitsstudie „Zulässigkeit Gefahrguttransporte – Tunnel Leverkusen“ [3] aufgeführt.

2.2 Verkehrsdaten

Es wurden für das Bemessungsjahr 2030 prognostizierte Verkehrsbelastungen für den Tunnel Leverkusen verwendet. In Kapitel 5.1 der Machbarkeitsstudie „Zulässigkeit Gefahrguttransporte – Tunnel Leverkusen“ [3] sind die prognostizierten Verkehrsdaten aufgeführt. Die vorgeschriebene Geschwindigkeit beträgt 80 km/h. Es wird eine Stauwahrscheinlichkeit von 50 h/a angenommen.

Da keine streckenbezogenen Erhebungen vorliegen, wird der Anteil der Gefahrguttransporte unter Berücksichtigung des erhöhten Gefahrgutaufkommens am Chemiestandort Leverkusen mit 7,2 % des Schwerverkehrs angenommen. Dies entspricht einem 20 %-Aufschlag auf den Bundesmittelwert von 6 %. Der Anteil der Busse wird gemäß [1] mit 5 % berücksichtigt. Weitere relevante Werte können Tabelle 2.1 entnommen werden.

Parameter Verkehr	**Wert**
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr	7,2 % [1)]
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	1,3 x DTV/24h
Verkehrsstärke pro Stunde Nacht	0,5 x DTV/24h
Personenbesetzungsgrad Pkw	1,5
Personenbesetzungsgrad Lkw	1,1
Personenbesetzungsgrad Bus	40

1) Berücksichtigung des erhöhten Gefahrgutaufkommens am Chemiestandort Leverkusen

Tabelle 2.1: Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland [1]

2.3 Meteorologie

Die meteorologischen Daten sind im Verfahren hinsichtlich der Ausbreitungsrechnungen für den Tunnel Leverkusen nicht maßgebend. Durch die stark ausgeprägte Troglage können die Windwirkungen und damit einhergehende Portaldrücke vernachlässigt werden.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

3 Kategorisierung von Straßentunneln nach ADR 2007

3.1 Vorgehen

Unter Anwendung der Methoden der quantitativen Risikoanalyse wurde eine Verfahrensbeschreibung zur Kategorisierung von Straßentunneln in [1] entwickelt.

Dieses Verfahren wird in der vorliegenden Untersuchung in Stufe 2a zur Anwendung gebracht und im Folgenden skizziert. Für genauere Angaben wird auf [1] und [2] verwiesen.

Ablaufmodellierung
Der Ablauf der verschiedenen Ereignisse wird mit Hilfe eines Ereignisbaums modelliert. Die einzelnen Ereignisabläufe setzen sich aus dem Initialereignis (z.B. Freisetzung von Benzin), Zwischenzuständen (z.B. spontane oder kontinuierliche Freisetzung, Zündung ja oder nein) und dem Endzustand (Szenarien) zusammen und bilden die Verzweigungen des Ereignisbaumes. Abbildung 3.1 zeigt das System des Ereignisbaumes.

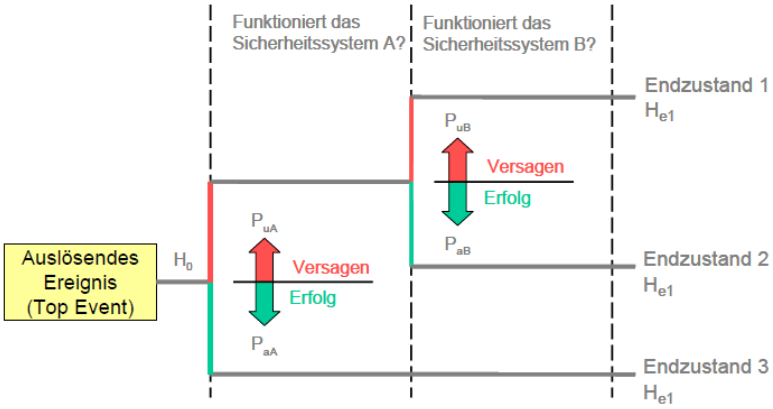


Abbildung 3.1: Beispiel eines Ereignisbaumes [2]

Häufigkeitsermittlung
Jedem Initialereignis und jeder weiteren Verzweigung im Ereignisbaum werden bestimmte Eintrittshäufigkeiten zugeteilt, die sich aus Statistiken, Untersuchungen oder Expertenabschätzungen ergeben. Die Häufigkeiten der Endzustände (Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien) lassen sich aus dem Produkt der einzelnen Häufigkeiten des durchlaufenen Zweigs berechnen.

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

$H_{e,i}$ = Häufigkeit der Endzustände
H_0 = Eintrittswahrscheinlichkeit des Initialereignisses
P_i = Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i

Schadensausmaßermittlung
Das Schadensausmaß wird als Anzahl der Todesopfer des jeweiligen Szenarios angegeben und wird zum einen mit Hilfe komplexer Rechenmodelle, zum andern mittels realitätsnahen Expertenabschätzungen ermittelt. Das Ausmaß hängt z.B. von der Größe des Initialereignisses, von der Anzahl der Fahrzeuge bzw. Personen im Tunnel, etc. ab.

Risikoermittlung
Das Risiko kann als Schadenserwartungswert (Produkt aus Ereignishäufigkeit und Schadensausmaß) angegeben oder im Summenhäufigkeitsdiagramm dargestellt werden.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

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

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

Bei Summenhäufigkeitsdiagrammen wird die Häufigkeit des Ereignisses über dem Schadensausmaß aufgetragen (siehe Abbildung 3.2).

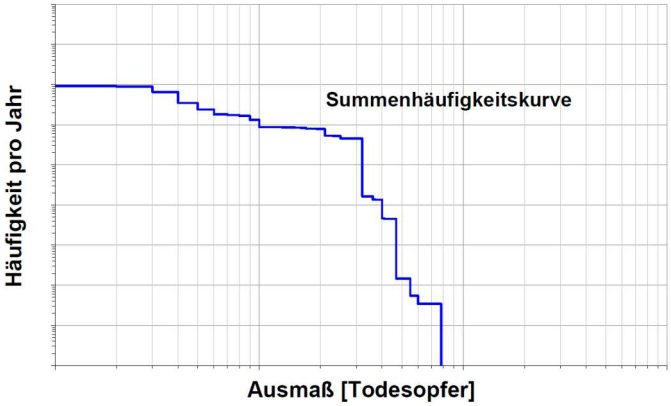


Abbildung 3.2: Beispiel eines Summenhäufigkeitsdiagramms [1]

Risikobewertung

Zur Bewertung dienen Risikoakzeptabilitätswerte bzw. Risikoakzeptabilitätskurven (siehe Abbildung 3.3). Im Falle einer Beschränkung eines Gefahrgutes wird der Tunnel einer Kategorie zugeordnet. Die Tunnelbeschränkungscodes lassen sich unter Berücksichtigung der Wirkungsart und des Schadensausmaßes nach Tabelle 3.1 festlegen. Die Kategorisierung eines Tunnels erfolgt über die resultierende Gesamtkurve.

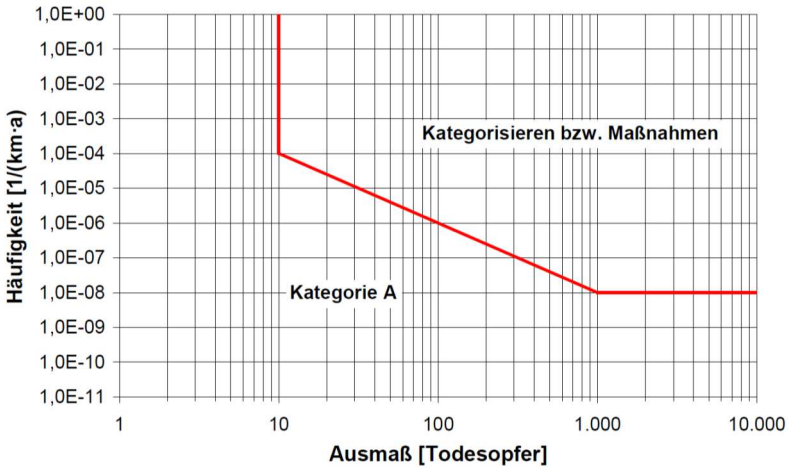


Abbildung 3.3: Bewertungskriterium Stufe 2a mit Vergleichsgeraden [1]

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

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 - sehr großen Explosion führen können
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem - sehr großen Explosion - großen Explosion - umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe führen können
D	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem - sehr großen Explosion - großen Explosion - umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe - großen Brand führen können
E	Beschränkung für alle gefährlichen Güter außer UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373

Tabelle 3.1: Tunnelkategorien [1]

3.2 Festlegung der Leitstoffe

Das Schadensausmaß einer Freisetzung von Gefahrgütern hängt von der Art der freigesetzten Gefahrstoffe ab. Aufgrund des großen Spektrums an möglichen Gefahrstoffen und Freisetzungsmengen werden die personenbezogenen Gefahrgutwirkungen mit charakteristischen Repräsentanten (Leitstoffe) dargestellt. Die maßgeblichen Gefahrgutwirkungen sind Brandwirkung, Toxizität und Explosions- und Druckwirkung. Die relevanten Gefahrgüter werden in die vier Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT eingeteilt. [1] Die bestimmten Stoffe decken die Gefahrgutklassen 1 bis 3 ab, auf die sich wiederum ca. 90 % der Gefahrguttransporte in Deutschland verteilen [2]. Die Eigenschaften der Leitstoffe und deren zugeordnete Einzelstoffe sind in Tabelle 3.2 aufgeführt:

Leitstoff	Maßgebliche Stoffeigenschaft	Wichtigste Vertreter	Gefährdung von Personen durch ...
Benzin (Gefahrgutklasse 3)	Flüssig, leicht brennbar	Benzin u. ähnliche Treibstoffe, diverse Lösungsmittel	- Hitzeeinwirkung infolge Brand - Raucheinwirkung
Propan (Gefahrgutklasse 2)	Gasförmig, leicht brennbar	Propan, Butan, andere Kohlenwasserstoffe, Vinylchlorid	- Hitzeeinwirkung infolge Brand - Druckwirkung und Trümmerwurf infolge Explosion
Chlor (Gefahrgutklasse 2)	Gasförmig, humantoxisch	Chlor, Chlorwasserstoff, Ammoniak	- Humantoxische Wirkungen bei Aufnahme über die Atemwege
Trinitrotoluol (TNT) (Gefahrgutklasse 1)	Fest, explosiv	TNT, Ammoniumnitrat, Ammoniumperchlorat	- Druckwirkung und Trümmerwurf infolge Explosion

Tabelle 3.2: Definition Leitstoffe [1]

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

- Gefahrgutklasse 1 (explosive Stoffe): TNT
- Gefahrgutklasse 2 (Gase): Propan, Chlor
- Gefahrgutklasse 3 (entzündbare, flüssige Stoffe): Benzin

3.3 Festlegung der Szenarien

Den vier Hauptgefahren aus dem Gefahrguttransport lassen sich leitstoff- und mengenspezifische Szenarien zuordnen. Diese Gefahren sind eine sehr große Explosion, eine große Explosion, das Freiwerden giftiger Stoffe und eine große Brandgefahr. Jedem Leitstoff werden zwei unterschiedliche Freisetzungsmengen zugeordnet, die wiederum unterschiedliche Ausbreitungs- und Wirkungsarten zur Folge haben [1]. Tabelle 3.3 zeigt die untersuchten Szenarien mit den zugehörigen Gefahren.

Leitstoff	Nr. Szen.	Freisetzungsart	Freigesetzte Menge	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR	Kategorie
Benzin	1	spontane Freisetzung mit einer Rate von 300 kg/s	15 t	große Brandgefahr	D
	2	kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 20 kg/s	8 t	-	E
Propan	3	spontane Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s und kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 30 kg/s	12 t	sehr große Explosionsgefahr	B
	4	spontane Freisetzung mit einer Rate von 400 kg/s und kontinuierliche Freisetzung mit einer Rate von 30 kg/s	1 t	große Brandgefahr	D
Chlor	5	spontane Freisetzung mit einer Rate von 66,6 kg/s	4 t	Freisetzung giftiger Stoffe	C
	6	spontane Freisetzung mit einer Rate von 50 kg/s	50 kg	-	E
TNT	7	Transport von 1000 kg TNT äquivalent; nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird	1 t	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	große Explosionsgefahr	C

Tabelle 3.3: Definition Szenarien [1]

3.4 Ermittlung der Häufigkeiten

Sowohl jedem Initialereignis als auch allen folgenden Verzweigungen des Ereignisbaumes müssen Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden. Die leitstoffspezifischen Wahrscheinlichkeiten werden entweder aus [1] entnommen oder durch realitätsnahe Überlegungen angenommen.

3.4.1 Häufigkeiten und Freisetzungen

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Initialereignisse können aus vorhandenen Daten zur Fahrleistung und zu Unfällen der betreffenden Strecke ermittelt werden. Da diese streckenspezifischen Daten nicht vorliegen, muss auf statistische Mittelwerte zurückgegriffen werden, die aus [1] entnommen werden können. Hilfswerte für Raten von Unfällen mit

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Freisetzungen auf offener Strecke sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. Für den Autobahntunnel Leverkusen wurden die Werte gemäß der Spalte BAB gewählt.

Klassen	**Innerorts [1/10^8 Fz-km]**	**Außerorts [1/10^8 Fz-km]**	**BAB [1/10^8 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

Tabelle 3.4: Hilfswerte für Raten von Unfällen mit Freisetzungen (offene Strecke) [1]

Die Festlegung der Häufigkeiten von Unfällen mit Freisetzungen hängt in Bezug auf Tunnel vom Standort ab. Im Gegensatz zur offenen Strecke ist die Unfallrate im Tunnelinnern kleiner, im Portalbereich etwas erhöht. Abbildung 3.4 zeigt die Verteilung der Unfallrate basierend auf der Unfallrate für offene Strecken des Straßentyps BAB. Deshalb wurde der verminderten Unfallrate gegenüber der offenen Strecke Rechnung getragen und ein Minderungsfaktor von 0,67 angesetzt.

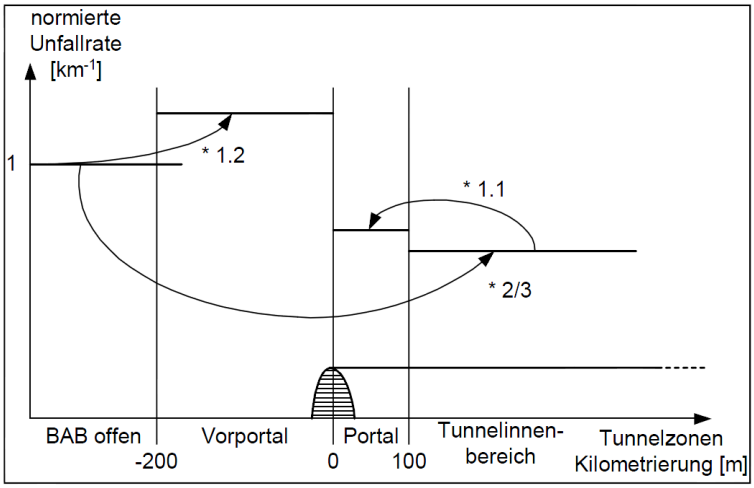


Abbildung 3.4: Festlegung der Verteilung der Unfallraten innerhalb des Tunnels [1]

Es ist zu berücksichtigen, dass die Leitstoffe nur einen Anteil am Transport der jeweiligen Gefahrgutklasse bilden, s. Tabelle 3.5. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Gefahrgutklasse ebenfalls nur einen Anteil am Gesamtgefahrgutaufkommen bildet. Neben den Leitstoffen müssen außerdem weitere Vertreter der jeweiligen Gefahrgutklasse mit ähnlichen Wirkungen im Ereignisfall berücksichtigt werden. Dies geschieht über Korrekturfaktoren für den jeweiligen Leitstoff nach Tabelle 3.6.

Leitstoff	**Gefahrgutklasse**	**Anteil**
Benzin	3	30 %
Propan	2	20 %
Chlor	2	4 %
TNT	1	100 %

Tabelle 3.5: Transportanteil je Leitstoff [2]

Leitstoff	**Korrekturfaktor**
Benzin	1,20
Propan	1,25
Chlor	2,30
TNT	1,00

Tabelle 3.6: Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung weiterer Stoffe [1]

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Über den Gefahrgutverkehr kann dann die Freisetzungshäufigkeit pro Jahr und Kilometer bestimmt werden.

3.4.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Benzin

Freisetzungsart: Für den Leitstoff Benzin kommt es in 90 % der Fälle zu einer kontinuierlichen, in 10 % der Fälle zu einer spontanen Freisetzung.

Art der Zündung: Die Wahrscheinlichkeiten der Art der Zündung sind wie folgt festgelegt:

spontane Freisetzung	sofort	35 %
	verzögert	5 %
	keine	60 %
kontinuierliche Freisetzung	sofort	15 %
	verzögert	5 %
	keine	80 %

Ereignisort: Pro Röhre werden als Ereignisorte die Abschnittsmitten der prägenden Querschnitte der Hauptröhren bzw. der Zu-/Abfahrt definiert. Mittels der entsprechenden Streckenlängen bzw. -breiten lassen sich die Verzweigungswahrscheinlichkeiten bestimmen.

Zeitraum: Aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsaufkommen während den Tages- und Nachtzeiten befindet sich eine unterschiedliche Anzahl von Personen und Fahrzeugen im Tunnel. Der Zeitraum von 6:00 bis 21:00 Uhr wird als Tagstunden bezeichnet, der Zeitraum von 21:00 bis 6:00 Uhr als Nachtstunden. Daraus ergibt sich eine Verteilung von 62,5 % Tagstunden und 37,5 % Nachtstunden bezogen auf einen Tag.

Verkehrszustand: Es wird zwischen flüssigem und stockendem Verkehr bzw. Stau unterschieden. Es wird angenommen, dass bezogen auf ein Jahr 50 Stunden Stau bzw. stokkender Verkehr auftreten.

Ereignisdetektion: Für den Tunnel Leverkusen ist eine automatische Branddetektion vorgesehen. Ob das Ereignis (Brand, Unfall, etc.) detektiert wird, hängt von mehreren Einflüssen ab. Es wird von einer Detektion in 99,5% der Fälle ausgegangen. Die Detektion des Ereignisses erfolgt 1 min nach Brandentstehung.

Tunnelsperrung: Eine erfolgreiche Tunnelsperrung hängt z.B. von der Ereignisdetektion und der Verfügbarkeit der Sperreinrichtung ab. Die Tunnelsperrung erfolgt in 99,5% der Fälle.

Lüftungssystem: Der Tunnel Leverkusen besitzt eine mechanische Längslüftungsanlage mit Strahlventilatoren.

Erhöhtes Ausmaß: Zum erhöhtem Ausmaß zählen Fahrzeuge mit erhöhtem Personenbesetzungsgrad (z.B. Busse). Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Anteil von Bussen am Gesamtverkehr, d.h. in 1 % der Fälle kommt es zu einem Ereignis mit erhöhtem Ausmaß.

Fremdrettung: Für die Rettung der Personen im Gefahrenbereich durch Rettungsdienste wird angenommen, dass in 5 % der Fälle 30 % der Personen rechtzeitig evakuiert werden können.

3.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Propan

Freisetzungsart: Für den Leitstoff Propan kommt es in 95 % der Fälle zu einer kontinuierlichen, in 5 % der Fälle zu einer spontanen Freisetzung.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Art der Zündung: Die Wahrscheinlichkeiten der Art der Zündung sind wie folgt festgelegt:

spontane Freisetzung	sofort	65 %
	verzögert	5 %
	keine	30 %
kontinuierliche Freisetzung	sofort	25 %
	verzögert	5 %
	keine	70 %

Ereignisort: Pro Röhre werden als Ereignisorte die Abschnittsmitten der prägenden Querschnitte der Hauptröhren bzw. der Zu-/Abfahrt definiert. Mittels der entsprechenden Streckenlängen bzw. -breiten lassen sich die Verzweigungswahrscheinlichkeiten bestimmen.

Zeitraum: Aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsaufkommen während den Tages- und Nachtzeiten befindet sich eine unterschiedliche Anzahl von Personen und Fahrzeugen im Tunnel. Der Zeitraum von 6:00 bis 21:00 Uhr wird als Tagstunden bezeichnet, der Zeitraum von 21:00 bis 6:00 Uhr als Nachtstunden. Daraus ergibt sich eine Verteilung von 62,5 % Tagstunden und 37,5 % Nachtstunden bezogen auf einen Tag.

Verkehrszustand: Es wird zwischen flüssigem und stockendem Verkehr bzw. Stau unterschieden. Es wird angenommen, dass bezogen auf ein Jahr 50 Stunden Stau bzw. stokkender Verkehr auftreten.

Ereignisdetektion: Für den Tunnel Leverkusen ist eine automatische Branddetektion vorgesehen. Ob das Ereignis (Brand, Unfall, etc.) detektiert wird, hängt von mehreren Einflüssen ab. Es wird bei einem Ereignis mit Brandentwicklung von einer Detektion in 99,5% der Fälle ausgegangen. Die Detektion des Ereignisses erfolgt 1 min nach Brandentstehung.

Tunnelsperrung: Eine erfolgreiche Tunnelsperrung hängt z.B. von der Ereignisdetektion und der Verfügbarkeit der Sperreinrichtung ab. Die Tunnelsperrung erfolgt in 99,5% der Fälle.

Lüftungssystem: Der Tunnel Leverkusen besitzt eine mechanische Längslüftungsanlage mit Strahlventilatoren.

Erhöhtes Ausmaß: Zum erhöhtem Ausmaß zählen Fahrzeuge mit erhöhtem Personenbesetzungsgrad (z.B. Busse). Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Anteil von Bussen am Gesamtverkehr, d.h. in 1 % der Fälle kommt es zu einem Ereignis mit erhöhtem Ausmaß.

Fremdrettung: Es wird angenommen, dass in 5 % der Fälle 30 % der Personen rechtzeitig evakuiert werden können.

3.4.3 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff Chlor

Freisetzungsart: Für den Leitstoff Chlor kommt es in 100 % der Fälle zu einer spontanen Freisetzung.

Ereignisort: Pro Röhre werden als Ereignisorte die Abschnittsmitten der prägenden Querschnitte der Hauptröhren bzw. der Zu-/Abfahrt definiert. Mittels der entsprechenden Streckenlängen bzw. -breiten lassen sich die Verzweigungswahrscheinlichkeiten bestimmen.

Zeitraum: Aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsaufkommen während den Tages- und Nachtzeiten befindet sich eine unterschiedliche Anzahl von Personen und Fahrzeugen im Tunnel. Der Zeitraum von 6:00 bis 21:00 Uhr wird als Tagstunden bezeichnet, der Zeitraum von 21:00 bis 6:00 Uhr als Nachtstunden. Daraus ergibt sich eine Verteilung von 62,5 % Tagstunden und 37,5 % Nachtstunden bezogen auf einen Tag.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Verkehrszustand: Es wird zwischen flüssigem und stockendem Verkehr bzw. Stau unterschieden. Es wird angenommen, dass bezogen auf ein Jahr 50 Stunden Stau bzw. stokkender Verkehr auftreten.

Ereignisdetektion: Für den Tunnel Leverkusen ist keine Chlordetektion vorgesehen.

Tunnelsperrung: Aufgrund nicht vorgesehener Chlor-Detektionseinrichtungen ist eine Sperrung des Tunnels nicht Bestandteil des Ereignisbaumes.

Lüftungssystem: Der Tunnel Leverkusen besitzt eine mechanische Längslüftungsanlage mit Strahlventilatoren.

Erhöhtes Ausmaß: Zum erhöhtem Ausmaß zählen Fahrzeuge mit erhöhtem Personenbesetzungsgrad (z.B. Busse). Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Anteil von Bussen am Gesamtverkehr, d.h. in 1 % der Fälle kommt es zu einem Ereignis mit erhöhtem Ausmaß.

Fremdrettung: Die Rettung der Personen im Gefahrenbereich durch Rettungsdienste ist bei Chlor sehr gering. Es wird angenommen, dass in 1 % der Fälle 10 % der Personen rechtzeitig für das Szenario Chlor 50 kg evakuiert werden können. Für die große Freisetzungsmenge wird keine Interventionsmöglichkeit angesetzt.

3.4.4 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Leitstoff TNT

Art der Zündung: Im Falle des Leitstoffes TNT entsteht verfahrensgemäß sehr hoher Druck durch hohe kinetische Energie (z.B. Aufprall) oder das Fahrzeug gerät nach einem Unfall in Brand mit dadurch ausgelöster nachfolgender Explosion. In 10 % der Fälle wird eine sofortige Zündung angenommen. In 60 % der Fälle erfolgt eine verzögerte Zündung und es kommt zur Detonation nach ca. 30 min, zu 30 % erfolgt keine Zündung.

Ereignisort: Pro Röhre werden als Ereignisorte die Abschnittsmitten der prägenden Querschnitte der Hauptröhren bzw. der Zu-/Abfahrt definiert. Mittels der entsprechenden Streckenlängen bzw. -breiten lassen sich die Verzweigungswahrscheinlichkeiten bestimmen.

Zeitraum: Aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsaufkommen während den Tages- und Nachtzeiten befindet sich eine unterschiedliche Anzahl von Personen und Fahrzeugen im Tunnel. Der Zeitraum von 6:00 bis 21:00 Uhr wird als Tagstunden bezeichnet, der Zeitraum von 21:00 bis 6.00 Uhr als Nachtstunden. Daraus ergibt sich eine Verteilung von 62,5 % Tagstunden und 37,5 % Nachtstunden bezogen auf einen Tag.

Verkehrszustand: Es wird zwischen freiem und stockendem Verkehr bzw. Stau unterschieden. Es wird angenommen, dass bezogen auf ein Jahr 50 Stunden Stau bzw. stokkender Verkehr auftreten.

Ereignisdetektion: Für den Tunnel Leverkusen ist eine automatische Branddetektion vorgesehen. Das Brandszenario wird in die Untersuchung des Leitstoffes TNT nicht eingerechnet.

Tunnelsperrung: Aufgrund nicht vorgesehener Detektionseinrichtungen ist eine Sperrung des Tunnels nicht Bestandteil des Ereignisbaumes.

Lüftungssystem: Der Tunnel Leverkusen besitzt eine mechanische Längslüftungsanlage mit Strahlventilatoren.

Erhöhtes Ausmaß: Zum erhöhtem Ausmaß zählen Fahrzeuge mit erhöhtem Personenbesetzungsgrad (z.B. Busse). Die Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Anteil von Bussen am Gesamtverkehr, d.h. in 1 % der Fälle kommt es zu einem Ereignis mit erhöhtem Ausmaß.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Fremdrettung: Die Rettung der Personen im Gefahrenbereich durch Rettungsdienste bzw. Selbstrettung ist bei TNT aufgrund der verzögerten Zündung sehr hoch und wird zu 90 % angenommen. Die daraus entstehende Ausmaßminderung wird bei der Ausmaßabschätzung mit berücksichtigt.

3.5 Ausbreitungs- und Strömungsberechnungen

3.5.1 Grundlagen 3-dimensionale Modellierung

CFD steht für Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungsberechnungen) und ist eine Methode der Strömungsmechanik. Sie hat zum Ziel, mit Hilfe von numerischen Methoden, ein vorgegebenes, strömungsmechanisches Problem zu lösen. Die meisten Problemstellungen befassen sich mit der Lösung der dreidimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen. Dabei handelt es sich um ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen 2. Ordnung, die die Strömung eines Newtonschen Fluides (z.B. Luft, Wasser) komplett beschreiben.

Dieses System von Gleichungen wird im Allgemeinen anhand der finiten Volumen Methode gelöst. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass a priori die Erhaltungsgleichungen eingehalten werden. Für dieses Verfahren ist es nötig, das physikalisch interessante Gebiet in ein Berechnungsgebiet überzuführen und dieses in kleine Volumina zu unterteilen. Für diese einzelnen Volumina, auch Zellen genannt, werden dann die entsprechenden Gleichungen gelöst.

Die hier durchgeführten Simulationen werden mittels der Software „Fire Dynamics Simulator“ kurz „FDS“ erstellt. Dabei handelt es sich um ein Programm, das vom „National Institute for Standards and Technology“ der Vereinigten Staaten von Amerika entwickelt wurde. Dieses Programm ist speziell zur Simulation von thermisch getriebenen Strömungen (Situationen mit Dichteunterschieden) geeignet und legt einen Schwerpunkt auf den Transport von Rauch und Wärme von Feuern durch die Strömung. [9] [10]

FDS ermöglicht Strömungsvorgänge, Wärmeübertragung, Auf-/Abtrieb durch Dichteunterschiede sowie Verbrennungsprozesse zu simulieren. Die grundlegenden Gleichungen werden dabei in zeitlich aufgelöster Form gelöst. Die Turbulenz innerhalb der Strömung wird mittels einem so genannten „Large Eddie“ Ansatz modelliert, da die Berechnung der Strömung ohne Modellierung des turbulenten Anteils nicht durchführbar ist. Das verwendete Modell erlaubt es, groß- und mittelskalige Wirbel genau abzubilden. Dieses Modell ist somit eines mit großem Detaillierungsgrad und dementsprechend aufwändig. Zur Komplexität des Modells trägt die Berücksichtigung der Strahlung ebenfalls bei.

Die Turbulenzmodellierung geschieht anhand eines LES-basierten Modells (LES = Large Eddy Simulation). Das heißt, dass große Wirbelstrukturen direkt berechnet werden und dass Wirbelstrukturen kleiner als das Auflösungsvermögen des Rechenmodells (Gitterweite) numerisch modelliert werden.

Alle Simulationen werden instationär durchgeführt, damit der zeitliche Ablauf der Szenarien ebenfalls ausgewertet werden kann. Der Zeitschritt für die zeitliche Integration der Gleichungen wird aufgrund des CFL Kriteriums gewählt, welches besagt, dass der maximale Zeitschritt limitiert ist durch den größten Quotienten aus kleinstem Gitterabstand und größter auftretende Geschwindigkeit. Aufgrund von Stabilitätsgründen wird ein zusätzlicher Faktor verwendet um den Zeitschritt nochmals zu verkleinern.

3.5.2 Tunnelmodell

Geometrie
Damit die oben beschriebene numerische Methode angewendet werden kann, ist es notwendig, die reale Geometrie zu einer numerischen Geometrie zu diskretisieren. Dabei werden alle Details, welche die Strömungsvorgänge im Tunnel in vernachlässigbarer Weise beeinflussen ausgeschlossen. Primär werden somit die Wände, die Fahrbahn sowie

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

aufgestaute Fahrzeuge berücksichtigt. Auf diese Geometrie wird ein Gitter gelegt, aus dessen Gitterpunkten die Strömungsgrößen berechnet werden.

Die im Tunnel aufgestauten Fahrzeuge sind ein wichtiges Element, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, da der freie Querschnitt im Tunnel durch diese reduziert wird, der Strömungswiderstand ansteigt und die Vermischung verstärkt wird (im Vergleich zum leeren Tunnel). Diese Fahrzeuge befinden sich während der gesamten Simulation im Tunnel und sind statisch. Die Dimensionen wurden so gewählt, dass sie den Fahrzeugdimensionen von Pkw und Lkw ungefähr entsprechen.

Der Steigungsverlauf wird im Modell nicht als eine Höhendifferenz übernommen, sondern die Richtungsanteile der Erdbeschleunigung variieren entlang des Tunnels.

Randbedingungen
Neben den geometrischen Daten werden für die Berechnungen folgende Eingabedaten vorgegeben:

- Verkehrszustand: Verkehrsrichtung, Verkehrszahlen in Fahrzeugen pro Stunde, Fahrzeuggeschwindigkeiten und Lastwagenanteil
- Brand: Zeitlicher Beginn und Ort des Brandes, Verlauf und Höhe der Brandleistung

Um eine Strömungssimulation durchführen zu können, ist es notwendig, an den Rändern des Rechengebiets (z.B. an den Portalen) eine entsprechende Randbedingung vorzugeben. Diese bilden den Einfluss der Umgebung auf das Rechengebiet ab.

Die Tunnelwände als auch die Fahrbahn werden als isotherme Flächen modelliert. Das heißt, sie behalten trotz möglichem Wärmeübergang eine konstante, vorgegebene Temperatur. Im vorliegenden Fall liegt diese Temperatur bei 10°C.

Die Randbedingung an den Tunnelportalen ist so gestaltet, dass primär Ein- als auch Ausströmen erlaubt ist. So kann sich zum Beispiel eine geschichtete Strömung ausbilden: Im oberen Bereich strömt heiße Luft aus, im unteren fließt Außenluft in den Tunnel hinein.

Der Kolbeneffekt vom (noch) fahrenden Verkehr wird ebenfalls via Randbedingung an den Portalen modelliert. Dabei kann entweder direkt eine Strömungsgeschwindigkeit (am vom Brand weiter entfernten Portal) oder ein entsprechender Portaldruck vorgegeben werden. Die eventuell in den Tunnel einströmende Luft besitzt ebenfalls eine Temperatur von 10°C.

3.5.3 Ausbreitungsmodellierung Benzin

Die Entzündung von Benzin und vergleichbaren Stoffen führt zu starker Hitze- und Rauchentwicklung. Die Bestimmung der Brandleistung erfolgt über Abmessungen einer flächigen Benzinlache und einer Wärmefreisetzungsrate pro Fläche. Die Brandleistung ergibt sich aus dem Produkt dieser beiden Größen. Im Rahmen der hier vorliegenden Betrachtungen für Benzin als Leitstoff wird dabei von einer Lache ausgegangen, welche je nach Szenario eine unterschiedliche Größe hat. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 3.7 aufgeführt.

Nr.	Szenario	Brandleistung gesamt [kW]	Lachengröße [m²]	Wärmefreisetzungsrate [kW / m²]
1	8 t, kont.	200000	84,6	2364
2	15 t, spontan	800000[1)]	503,1	1590

1) theoretische Brandleistung

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der verwendeten Lachengröße und Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit des Szenarios

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Entscheidend für die Brandleistung ist nicht die gesamte Menge des austretenden Benzins, sondern die Rate der Freisetzung. Deshalb wurden die Szenarien Benzin große Menge und spontane Freisetzung zu einem Szenario zusammengefasst, ebenso die Szenarien kleine Menge und kontinuierliche Freisetzung.

Aufgrund der Annahme, dass die Zündung verzögert erfolgt (nach 60 sec) und dass die Lache bestehend ist, wird die volle Brandleistung in Szenario 1 innerhalb eines Zeitraumes von 10 Sekunden erreicht. Die Brandleistung sinkt im ersten Szenario nach 400 sec, da der Tank entleert ist.

In Szenario 2 erfolgt eine sofortige Zündung nach 10 Sekunden. Die maximale Brandleistung wird innerhalb 60 sec erreicht und sinkt nach Ablauf und Abbrand der großen Lache im Tunnel nach 230 sec ab.

Nach Abklingen der Brandleistungen durch austretendes Benzin werden Folgebrände mit einer Brandleistung von 100 MW angesetzt.

Aufgrund der vorherrschenden Bedingungen wie z.B. Sauerstoffmangel kann die tatsächliche Brandleistung reduziert sein.

Der Wärmeübergang durch Strahlung wird mittels des Lösens der Strahlungstransportgleichungen für ein graues Gas berechnet. Die Modellierung der während der Verbrennung entstehenden Stoffe (Ruß und CO) geschieht über festgelegte Anteile, welche auf den Brandgut-Massenstrom wirken. Der Brandgut-Massenstrom ist durch die Brandleistung und die je nach Brandgut unterschiedlichen Heizwerte definiert.

3.5.4 Ausbreitungsmodellierung Propan

Die Propanszenarien werden neben den Austrittsmengen und Zündzeitpunkten durch im Tunnel herrschende Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. Die Berechnungen und Wirkmechanismen erfolgen analog dem Vorgehen des Referenzmanuals [6] zum OECD/PIARC-Modell.

Bei der verzögerten Zündung wird generell ein Gaswolkenbrand (VCE) angenommen, mit Ausnahme des kontinuierlichen Austritts der großen Menge, die über den Freistrahlbrand in einen Feuerball (BLEVE) mündet. Alle weiteren Szenarien ergeben direkt oder indirekt über Freistrahlbrand einen BLEVE.

Der Gaswolkenbrand verläuft mit einer Druckerhöhung bei Durchzündung, die in Abhängigkeit der Masse Propan im Tunnel, der Ausdehnung der Wolke und dem Abstand zum Ereignisort variiert.

Der BLEVE und der Gaswolkenbrand füllen gemäß konservativer Annahme das gesamte Volumen der Tunnelröhre aus und führen zu erhöhten Druckwirkungen im Tunnel im Vergleich zu einer Expansion im Freifeld.

3.5.5 Ausbreitungsmodellierung Chlor und TNT

Die Ausbreitung von Chlorgas wurde über FDS simuliert. Hierbei entfällt der thermische Antrieb der Strömungen. Entscheidend ist gegenüber den Brandszenarien die Kolbenwirkung des bis zum Ereigniszeitpunkt fließenden Verkehrs.

Da Chlor eine gegenüber Luft ca. 2,5-mal höhere Dichte besitzt, ist auch die Tunnelneigung zu berücksichtigen. Dabei kann Chlor in Abhängigkeit der Freisetzungsmenge und -geschwindigkeit sowie der Strömungsbedingungen im Tunnel in Richtung Gefälle „fließen“, wobei die Luft am Boden unterschichtet und verdrängt wird.

Die letale Wirkung des Chlors wird durch die Konzentration und Einwirkzeit bestimmt, die wiederum von den Ausbreitungsbedingungen abhängen.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Für die TNT-Szenarien wird angenommen, dass beide Mengen Sprengstoff bei der Explosion Druckspitzen erzeugen, die letal sind. Die Druckwelle verläuft in beiden Richtungen vom Ereignisort durch den gesamten Tunnel.

3.6 Wirk- und Entfluchtungsmodellierung

3.6.1 Grundlagen

Das Schadensausmaß wird durch Kopplung mit einem Entfluchtungsmodell errechnet und konservativ über Nomogramme zu Probit-Funktionen ermittelt.

Zur Berechnung wurde die HBI-Software ODEM eingesetzt, die in Abhängigkeit der Grenzkonzentrationen und -temperaturen die Anzahl an Opfern ausgibt. [7]

Die Software simuliert die Fluchtbewegung von Personen. Sie betrachtet Wechselwirkungen zwischen Person-Ereignis und Person-Strukturen.

In der Simulation müssen Gefahren- und Verhaltensoptionen berücksichtigt werden, um ein möglichst reales Szenario zu simulieren. Nachstehend sind die Festlegungen aufgeführt:

Es wird angenommen, dass das Erreichen einer Grenztemperatur bzw. einer Grenzkonzentration CO oder Chlor zum Tod von Personen führt.

Es wird vorausgesetzt, dass keine Personen durch die Ereigniszone flüchten. Weiterhin flüchten keine Personen durch eine verrauchte Zone.

Personen werden als Individuen modelliert. Sie verfügen zunächst alle über die gleichen Eigenschaften. Die Personen treten mit den Fahrzeugen in den Tunnel durch die Portale ein und haben zunächst die gleiche Geschwindigkeit auf der entsprechenden Spur.

Der Zeitabstand zwischen zwei folgenden Personen ergibt sich aus der Anzahl Fahrzeuge pro Stunde der entsprechenden Fahrspur und der mittleren Anzahl Personen pro Fahrzeug. Ab Brandausbruch fahren die Fahrzeuge, die den Brandherd bereits passiert haben, ungestört aus dem Tunnel aus. Die Fahrzeuge stauen sich vor dem Brandherd auf oder halten bereits an, wenn sie die Rauchfront erreichen.

Nach einer Zeit von 60 sec nach Alarmierung verlassen die Personen die Fahrzeuge. Bei Annäherung der Rauchfront oder Erreichen einer Grenztemperatur verlassen die Personen das Fahrzeug früher.

Wird ein Notausgang oder ein Tunnelportal erreicht, ist die Person „gerettet“ und überlebt. Die Personen nutzen den ersten erreichten Notausstieg, um in einen sicheren Bereich zu gelangen. Zu jedem Zeitschritt wird für die „lebenden“ Personen im Tunnel die Exposition errechnet. Die Berechnung bezieht eine lokale Brandgaskonzentration und die Expositionsdauer ein. Überschreitet die Exposition den Todesfall-Grenzwert, wird der Status der Person auf „tot“ gesetzt.

Der Fall von eingeklemmten Personen, die anschließend durch Brand- oder Chloreinwirkungen geschädigt werden, wird in den Berechnungen nicht modelliert.

Das resultierende Schadensausmaß ist neben den für die Szenarien getroffenen Annahmen und den berechneten Rauchausbreitungsverläufen von weiteren Einflüssen abhängig. Hierbei werden Annahmen getroffen, die ein durchschnittliches Verhalten der Verkehrsteilnehmer repräsentieren sollen.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

3.6.2 Einflüsse auf das Schadensausmaß

Einfluss auf das Schadensausmaß haben unter anderem:

- Reaktionszeiten und Fluchtgeschwindigkeiten
- Abstand und Anzahl der Notausgänge
- Vorhandensein einer Luft-/Rauchschichtung oder Luft-/Gasschichtung
- Fahrzeugbelegung

Reaktionszeiten und Fluchtgeschwindigkeiten
Für rauchfreie Umgebungen, z. B. Gebäude und Untergrundstationen, werden Fluchtgeschwindigkeiten zwischen 1,0 bis 2,0 m/s genannt (PIARC [8]). Für die Verhältnisse in einem Straßentunnel wird eine Geschwindigkeit von 0,5 bis 1,5 m/s je nach Sicht- und Beleuchtungsverhältnissen und Signalisierung geschätzt.

Die Zeit, die benötigt wird, um auf den Ereignisfall zu reagieren und das Fahrzeug zu verlassen, kann je nach Fahrzeug (Pkw, Reisebus) und Personen erheblich variieren; Geschätzt werden 0,5 bis 5 min. Die insgesamt notwendige Zeit setzt sich aus den Zeiten, um zu reagieren, um das Fahrzeug zu verlassen und aus der Fluchtzeit bis zum Notausgang zusammen.

Es wird hier eine mittlere Reaktionszeit („Pre-Movement“) auf den Ereignisfall und um das Fahrzeug zu verlassen von 1 min angesetzt. Die Fluchtgeschwindigkeiten werden mit 1,2 m/s bei Rauchfreiheit und 0,2 m/s im Rauch angenommen.

Erreicht die Rauchfront eine in Richtung Brandherd auf dem kürzeren Fluchtweg flüchtende Person (d.h. sie befindet sich in einem Bereich 10 m hinter bis 50 m vor der Front) ändert sie die Fluchtrichtung und flieht vom Brand weg.

Notausgänge
Die Anzahl und Anordnung der Notausgänge stellt neben der Tunnellüftung für Selbstrettungsmöglichkeiten von Personen im Tunnel einen wesentlichen Sicherheitsfaktor dar.

Für den Berechnungsfall werden die Notausgänge gemäß Kapitel 3.3 der Machbarkeitsstudie zur Zulässigkeit von Gefahrguttransporten im Tunnel Leverkusen [3] verwendet.

Fahrzeugbelegung
Für die Fahrzeugbelegungen werden die Werte gemäß Tabelle 2.1 im Abschnitt 2.2 verwendet.

Aus Fahrzeugbelegung und Flussdichte für flüssigen Verkehr oder Aufstaudichte für Stau kann die Anzahl der Personen im Tunnel berechnet werden.

Die Flussdichte berechnet sich aus dem mittleren stündlichen Verkehr und der Geschwindigkeit. Für die Aufstaudichte der Fahrzeuge wird gemäß RABT 2006 [11] von 150 PkwE/km ausgegangen. Ein Lkw oder Bus entspricht zwei Personenkraftwageneinheiten.

Der Anteil Busse am Schwerverkehr wird nach [2] mit 5 % angenommen und bei erhöhtem Ausmaß auf die Personenzahl in Tunnel aus Pkw- und Lkw-Verkehr aufgeschlagen.

Tunnelmodellierung
Die Geometrie entspricht den Kapitel 2.2 und 3 der Machbarkeitsstudie [3] angegebenen Abmessungen. Es wird angenommen, dass die Personen jeweils zum nächstliegenden Notausgang flüchten (ideales Fluchtverhalten).

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

4 Ergebnisse

4.1 Ausbreitung und Schadensausmaß Benzin

Nachstehend sind exemplarisch die Resultate der FDS-Simulationen zweier Szenarien mit dem Leitstoff Benzin aufgeführt. Der wesentliche Unterschied der beiden Szenarien liegt in den Brandleistungen. Im ersten Szenario tritt eine Brandleistung von 200 MW auf. Im zweiten Szenario beträgt die theoretische Brandleistung 800 MW.

Auf den folgenden Seiten sind die Resultate der FDS-Simulation für die zeitliche und räumliche Temperaturverteilung und Sichtweiten je eines Szenarios mit fließendem Verkehr in der Südröhre dargestellt.

4.1.1 Szenario 1 – 200 MW-Benzinbrand

In diesem Szenario tritt Benzin kontinuierlich aus einem Tankwagen aus. Die entstehende Benzinlache ergibt eine Brandleistung von 200 MW. Die Zündung erfolgt verzögert. Der Brandort liegt ca. bei Tunnelkilometer 404+315. Vor dem Ereignis ist der Verkehr flüssig. Die Fahrzeuge stauen sich vor dem Unfallort und fließen dahinter frei ab.

Die nachstehende Tabelle 4.1 zeigt die Temperaturverteilung in der Südröhre zu bestimmten Zeitpunkten.

Zur höheren Auflösung der Temperaturverteilungen der Ergebnisse wurden die Temperaturskalen auf 500°C beschränkt, auch wenn höhere Temperaturspitzen zu erwarten sind.

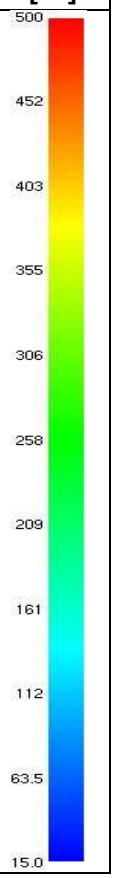
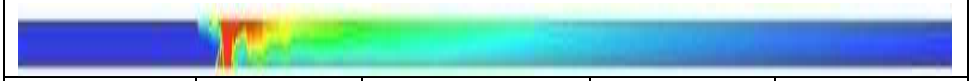
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala [°C]
					
a)	Y-Y	Temperatur	30 s		
b)	Y-Y	Temperatur	60 s		
c)	Y-Y	Temperatur	90 s		
d)	Y-Y	Temperatur	180 s		
					
e)	Y-Y	Temperatur	300s		
f)	Y-Y	Temperatur	600s		
Brandort:					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Wärmefreisetzung 200 MW, fließender Verkehr, Längslüftung					

Tabelle 4.1: Temperaturausbreitung eines 200 MW-Benzinbrandes

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

Aufgrund der hohen Rauchentwicklung wird die Sichtweite im Tunnel erheblich beeinflusst. Tabelle 4.2 zeigt die zeitliche Entwicklung der Sichtweiten innerhalb der Südröhre.

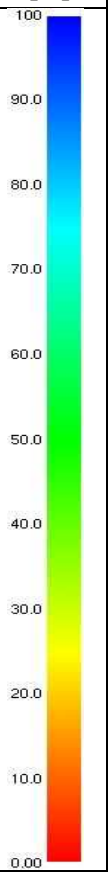
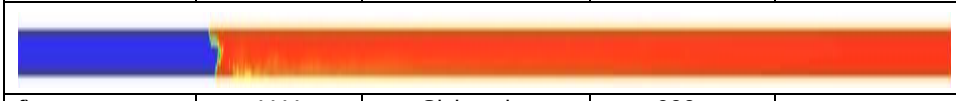
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala [m]
					
a)	Y-Y	Sichtweite	30 s		
b)	Y-Y	Sichtweite	60 s		
c)	Y-Y	Sichtweite	90 s		
d)	Y-Y	Sichtweite	180 s		
e)	Y-Y	Sichtweite	300s		
					
f)	Y-Y	Sichtweite	600s		
Brandort:					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Wärmefreisetzung 200 MW, fließender Verkehr, Längslüftung					

Tabelle 4.2: Sichtweite eines 200 MW-Benzinbrandes

4.1.2 Szenario 2 – 800 MW Benzinbrand

In diesem Szenario tritt Benzin spontan aus einem Tankwagen aus. Die entstehende Benzinlache ergibt eine theoretisch deutlich erhöhte Brandleistung von 800 MW. Die Zündung erfolgt sofort. Der Brandort liegt ca. bei Tunnelkilometer 404+315. Vor dem Ereignis ist der Verkehr flüssig. Die Fahrzeuge stauen sich vor dem Unfallort und fließen dahinter frei ab.

Die nachstehende Tabelle 4.3 zeigt die Entwicklung der Temperaturen in der Südröhre zu bestimmten Zeitpunkten. Zur höheren Auflösung der Temperaturverteilungen der Ergebnisse wurden die Temperaturskalen auf 800°C beschränkt, auch wenn höhere Temperaturspitzen zu erwarten sind. Im Vergleich zum 200 MW Benzinbrand werden höhere Temperaturen erreicht, die bedingt durch den schnelleren Abbrand der großen Benzinlache früher abklingen.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

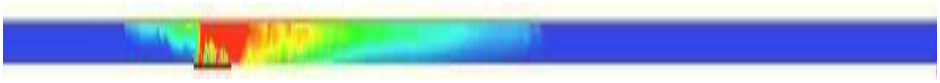
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala [°C]
a)	Y-Y	Temperatur	30 s		
b)	Y-Y	Temperatur	60 s		
					
c)	Y-Y	Temperatur	90 s		
d)	Y-Y	Temperatur	180 s		
e)	Y-Y	Temperatur	300s		
f)	Y-Y	Temperatur	600s		
Brandort:					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Wärmefreisetzung 800 MW, fließender Verkehr, Längslüftung					

Tabelle 4.3: Temperaturausbreitung eines 800 MW-Benzinbrandes

In Tabelle 4.4 ist die Entwicklung der Sichtverhältnisse im Fahrraum abgebildet. Im Szenario 2 schreitet die Rauchausbreitung schneller als im Szenario 1 voran. Weiterhin weist Szenario 2 eine ausgeprägtere Rauchausbreitung entgegen der Fahrtrichtung auf.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

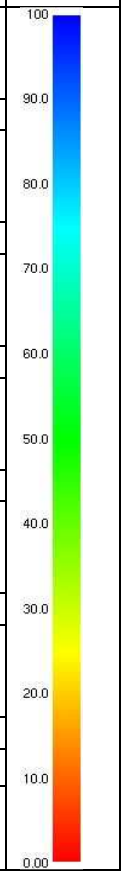
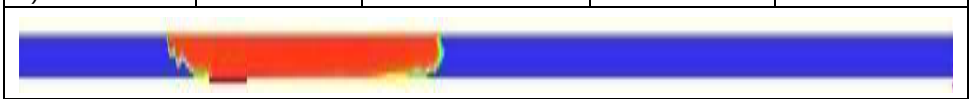
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala [m]
					
a)	Y-Y	Sichtweite	30 s		
					
b)	Y-Y	Sichtweite	60 s		
c)	Y-Y	Sichtweite	90 s		
d)	Y-Y	Sichtweite	180 s		
e)	Y-Y	Sichtweite	300s		
e)	Y-Y	Sichtweite	600s		
Brandort:					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Wärmefreisetzung 800 MW, fließender Verkehr, Längslüftung					

Tabelle 4.4: Sichtweite eines 800 MW-Benzinbrandes

4.2 Ausbreitung und Schadensausmaß Chlor

Nachstehend sind exemplarisch die Resultate der FDS-Simulationen mit einer Freisetzung des Leitstoffes Chlor bei fließendem Verkehr aufgeführt.

Der wesentliche Unterschied der Szenarien liegt in den freigesetzten Mengen. Im ersten Szenario werden 50 kg Chlor und im zweiten Szenario 4 t Chlor freigesetzt.

4.2.1 Szenario 1 – Chlor 50 kg

Der Ereignisort des Szenarios 1 befindet sich in der Südröhre ca. bei Tunnelkilometer 404+315. Vor dem Ereignis ist der Verkehr flüssig. Die Fahrzeuge stauen sich vor dem Unfallort und fließen dahinter frei ab.

Aufgrund der abklingenden Luftströmung durch den Kolbeneffekt des flüssigen Verkehrs und der der höheren Dichte breitet sich das Chlor bevorzugt in Strömungsrichtung und Bodennähe aus. Durch die noch vorherrschende Luftströmung wird die Gaswolke in Fahrtrichtung ausgeblasen.

Tabelle 4.5 zeigt die Resultate der FDS-Simulation für die zeitliche und räumliche Konzentrationsverteilung bei 50 kg Chlorfreisetzung.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

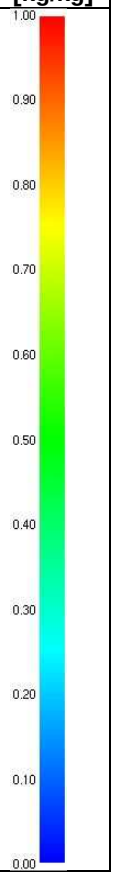
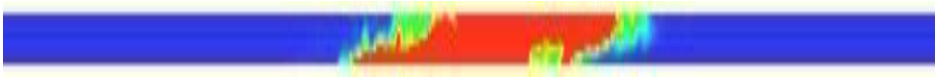
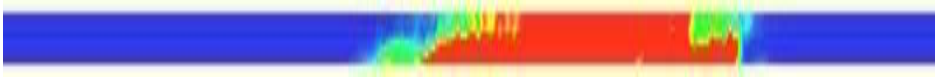
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala $1x10^{-3}$ [kg/kg]
					
a)	Y-Y	Cl-Konzentration	30 s		
b)	Y-Y	Cl-Konzentration	60 s		
c)	Y-Y	Cl-Konzentration	90 s		
d)	Y-Y	Cl-Konzentration	180 s		
					
e)	Y-Y	Cl-Konzentration	300s		
					
f)	Y-Y	Cl-Konzentration	600s		
Ereignisort:					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Chlor-Freisetzung 50 Kg, fließender Verkehr					

Tabelle 4.5: Chlorkonzentration bei 50 kg Chlorfreisetzung

4.2.2 Szenario 2 – Chlor 4 t

Der Ereignisort des Szenarios 2 befindet sich in der Südröhre ca. bei Tunnelkilometer 404+315. Vor dem Ereignis ist der Verkehr flüssig. Die Fahrzeuge stauen sich vor dem Unfallort und fließen dahinter frei ab.

Aufgrund der abklingenden Luftströmung durch den Kolbeneffekt des flüssigen Verkehrs und der der höheren Dichte breitet sich das Chlor bevorzugt in Strömungsrichtung und Bodennähe aus. Ein Ausblasen der Chlorgase durch die noch vorherrschende Luftströmung ist aufgrund der großen Menge an freigesetztem Chlor nicht möglich. Auch ist ein Ausbreiten der Gaswolke entgegen der Fahrtrichtung erkennbar.

In Tabelle 4.6 sind die Resultate der FDS-Simulation für die zeitliche und räumliche Konzentrationsverteilung bei 4 t Chlorfreisetzung dargestellt.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

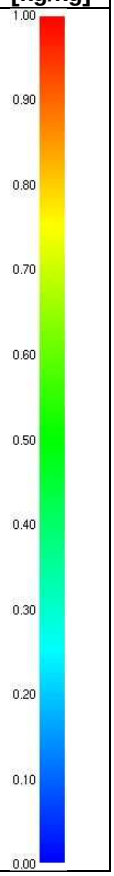
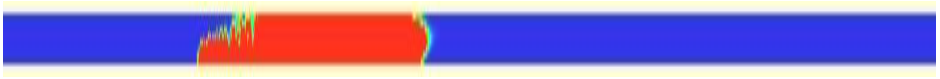
Abb.	Schnitt	Parameter	Zeitpunkt		Skala $1x10^{-3}$ [kg/kg]
					
a)	Y-Y	Cl-Konzentration	30 s		
b)	Y-Y	Cl-Konzentration	60 s		
					
c)	Y-Y	Cl-Konzentration	90 s		
d)	Y-Y	Cl-Konzentration	180 s		
e)	Y-Y	Cl-Konzentration	300s		
f)	Y-Y	Cl-Konzentration	600s		
Ereignisort					
Simuliertes Szenario: ADR, max. Chlor-Freisetzung 4.000 Kg, fließender Verkehr					

Tabelle 4.6: Chlorkonzentration bei 4 t Chlorfreisetzung

4.3 Risikoermittlung

4.3.1 Allgemeines

Die Resultate der Risikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter werden nachstehend in doppelt logarithmischen Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen in Form von Risikosummenkurven dargestellt. Sie zeigen, mit welcher Häufigkeit ein bestimmtes Schadensausmaß überschritten wird, dass durch Einwirkung von Gefahrguttransporten entsteht (entsprechend der gewählten Szenarien). Die Häufigkeit wird als jährliche Frequenz (Y-Achse), das Schadensausmaß als Summe aus Todesopfern (X-Achse) angegeben.

Diese Kurven sind wie folgt zu verstehen: Der Startpunkt der Kurve am Wert „1“ der x-Achse sagt aus, dass mit der zugeordneten Häufigkeit auf der y-Achse ein Ereignis auftritt, das ein und mehr Todesopfer fordert. Dem Wert „100“ ist auf der y-Achse die Häufigkeit zugeordnet, mit der ein Ereignis mit 100 und mehr Todesopfern auftritt.

Es ist anzumerken, dass die Wahrscheinlichkeit die Frequenz der Ereignisse beschreibt. Der Zeitpunkt des Auftretens kann schon morgen oder z.B. erst in 25.000 Jahren sein.

Abgebildet werden die Risikosummenkurven der Einzelszenarien und die resultierende Gesamtkurve aus allen Szenarien.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

4.3.2 Risikoermittlung Benzin

In Abbildung 4.1 sind die Summenkurven des Leitstoffes Benzin dargestellt. Beide Kurven verlaufen unterhalb der Vergleichskurve. Bei einer Menge von 15 t Benzin (spontane Freisetzung) kommt es einmal in ca. 36000 Jahren, bei einer Mengenfreisetzung von 8 t Benzin (kontinuierliche Freisetzung) einmal in ca. 900000 Jahren zu einem Ereignis mit einem und mehr Todesopfern. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung von 8 t Benzin entsteht eine Brandleistung von 200 MW und eine spontane Freisetzung von 15 t Benzin führt zu einer theoretischen Brandleistung von 800 MW.

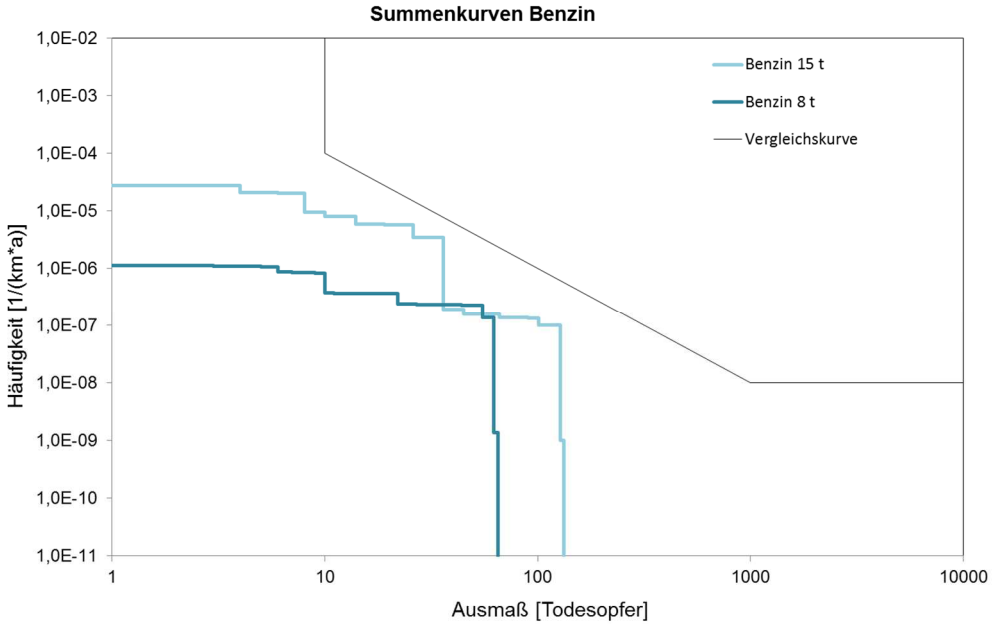


Abbildung 4.1: Summenkurven Benzin

Das Szenario einer spontanen Freisetzung dominiert den Verlauf der Summenkurven mit dem Leitstoff Benzin. Das hohe Schadensausmaß von ca. 130 Todesopfern bei spontaner Freisetzung von 15 t Benzin ist auf die Ereignisse mit Stau zurückzuführen. Durch die schnelle Ausbreitung von Hitze und Rauchgasen sind auch die Personen, die sich in Fahrtrichtung hinter dem Brandort befinden, massiv betroffen. Aufgrund der spontanen Freisetzung breitet sich die Lache bei großer Brandleistung unter starker Hitzeentwicklung aus. Damit sind die Personen, die sich unmittelbar am Ereignisort befinden, neben Rauch und Hitze direkt von Flammen betroffen.

Für die Szenarien mit Freisetzung von 15 t Benzin mit vor Ereignisbeginn flüssigem Verkehr ist ein geringeres Schadensausmaß zu erwarten. Im Gegensatz zum Staufall sind bei flüssigem Verkehr weniger Fahrzeuge durch das Ereignis betroffen, da die Fahrzeuge hinter dem Unfallort frei abfließen können.

Bei einer kontinuierlichen Freisetzung von 8 t Benzin mit einer Brandleistung von 200 MW ist das Schadensausmaß von ca. 65 Todesopfern auf die Ereignisse mit Stau zurückzuführen. Bei vorherrschendem flüssigem Verkehr liegt die Anzahl an zu erwartenden Todesopfern in einem Bereich von ca. 10 – 20.

4.3.3 Risikoermittlung Propan

In Abbildung 4.2 sind die Summenkurven des Leitstoffes Propan dargestellt. Beide Kurven überschreiten die Vergleichskurve. Bei einer Menge von 12 t Propan kommt es einmal in ca. 0,7 Millionen Jahren, bei 1 t Propan einmal in ca. 2,1 Millionen Jahren zu einem Ereignis mit mindestens einem Todesopfer.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

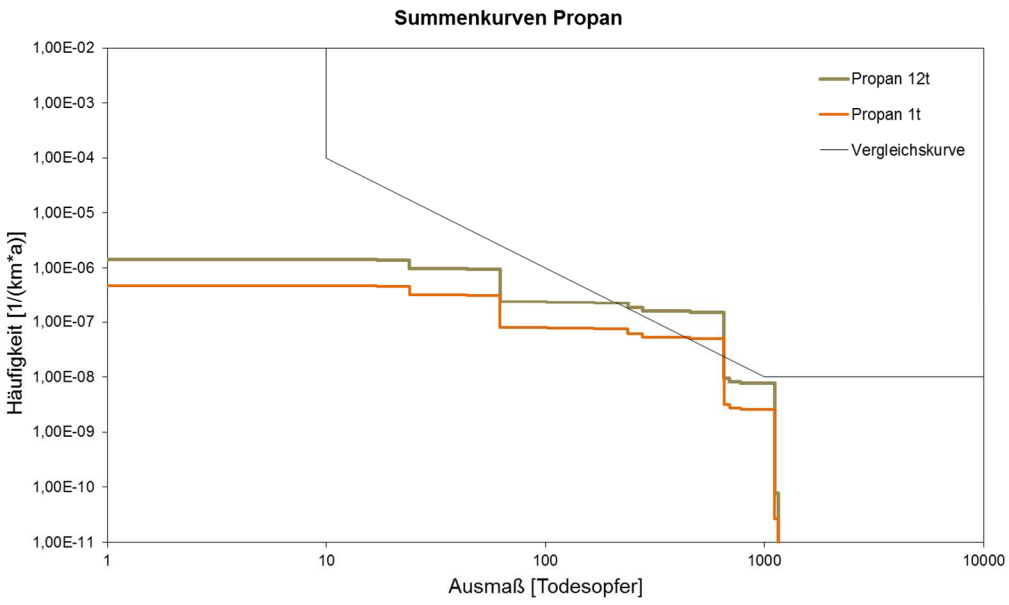


Abbildung 4.2: Summenkurven Propan

Beide Kurven haben einen ähnlichen Verlauf, da Ausbreitung, Wirkarten und Ausmaß für beide Szenarien beinahe identisch sind. Das Szenario mit 12 t Propan ist dominierend, da gemäß [1] drei Viertel der Propantransporte in Tankwagen abgewickelt werden.

Das hohe Ausmaß mit ca. 1100 Todesopfern ist für beide Szenarien identisch. Dabei handelt es sich um die Ereignisse mit stockendem Verkehr bzw. Stau, bei denen alle Personen im Tunnel aufgrund der Hitze- und Druckwirkung bei einem BLEVE umkommen. Ein Sprung in der Häufigkeit ist im Bereich von etwa 62 Todesopfern für beide Szenarien zu verzeichnen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einen BLEVE, der allerdings bei flüssigem Verkehr auftritt. Es kommen zwar auch alle Tunnelnutzer um, deren Zahl aber wegen der größeren Fahrzeugabstände bei flüssigem Verkehr ohne vorheriges Aufstauen geringer ist. (Zur Wirkart Freistrahlbrand wird gemäß Betrachtungsweise zum OECD-PIARC-Modell angenommen, dass dieser Brand immer zu einem BLEVE führt [6].)

Eine weitere Wirkart stellt der Gaswolkenbrand (VCE) dar. Das Ausmaß des Gaswolkenbrandes bei 12 t und 1 t Propan bei Stau liegt bei ca. 1100 Opfern. Dieses Ereignis besitzt eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit gegenüber dem BLEVE.

Weiterhin ist eine Stufe bei ca. 600 Opfern sichtbar, die flüssigem Verkehr und verzögerter Zündung erwartet werden. Bei diesen Bedingungen können die Fahrzeuge hinter dem Ereignisort aus dem Tunnel ausfahren und werden von der verzögerten Zündung nicht betroffen.

Die Stufen der Kurve resultieren aus den Verzweigungen erhöhtes Ausmaß und Fremdrettung, die zum treppenförmigen Verlauf der Kurve im Bereich dieser Schadensausmaße führen.

Zur dritten Wirkart Freistrahlbrand wird gemäß Betrachtungsweise zum OECD-PIARC-Modell angenommen, dass dieser Brand immer zu einem BLEVE führt [6].

4.3.4 Risikoermittlung Chlor

In Abbildung 4.3 sind die Summenkurven des Leitstoffes Chlor dargestellt. Beide Kurven verlaufen unterhalb der Vergleichskurve. Bei einer Menge von 4 t Chlor kommt es einmal

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

in ca. 4,6 Millionen Jahren, bei einer Freisetzung von 50 kg Chlor einmal in ca. 0,8 Millionen Jahren zu einem Ereignis mit einem und mehr Todesopfern.

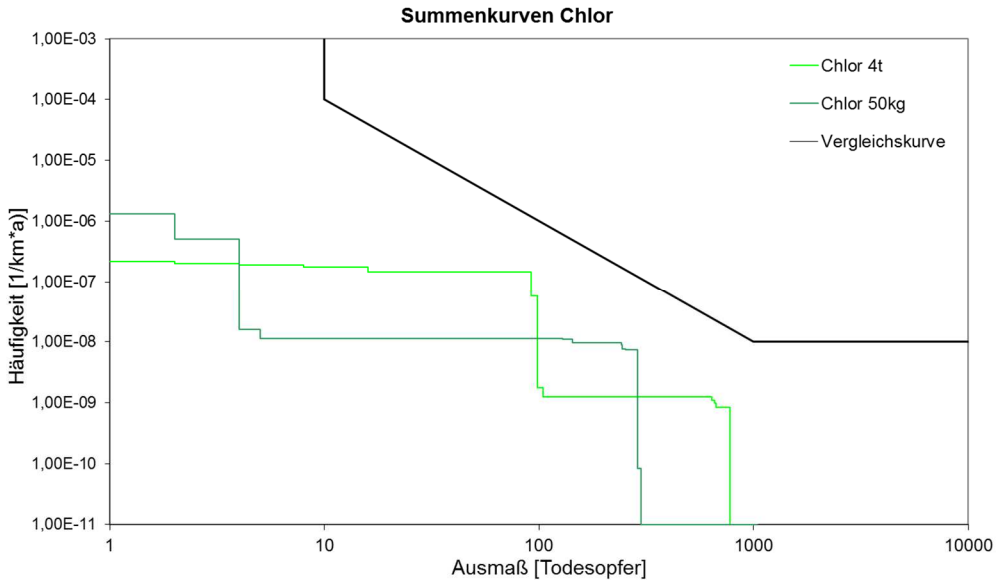


Abbildung 4.3: Summenkurven Chlor

In einem Bereich der mittleren und hohen Schadensausmaße werden die Szenarien mit dem Leitstoff Chlor vom Szenario 4 t Chlor dominiert. Im Bereich der geringen bzw. ein einem Bereich der mittleren Schadenausmaße dominiert das Szenario mit 50 kg Chlor. Die Unterschiede im Kurvenverlauf beruhen auf der Freisetzungsmenge. Das maximale Ausmaß ist bei der kleinen Menge Chlor deutlich geringer als das der großen Menge. Die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von 50 kg Chlor ist höher als die von 4 t Chlor.

Die Kurve des Szenarios von 4 t Chlor ist bei ca. 770 Opfern begrenzt. Hierbei handelt es sich um spontane Freisetzung von Chlor im Staufall. Bei einem Schadenausmaß von ca. 92 Opfern ist eine deutliche Stufe zu erkennen. Hierbei handelt es sich bei der Freisetzung von 4 t Chlor um das Ereignis mit flüssigem Verkehr. Die geringere Opferzahl resultiert daraus, dass die Fahrzeuge hinter dem Ereignisort noch ausfahren können. Die weitere Abtreppung ergibt sich aus den Verzweigungen erhöhtes Ausmaß, Tag und Nacht und Fremdrettung. Das Ausmaß der Freisetzung von 4 t ist im Gegensatz zu 50 kg Chlor generell sehr hoch.

Die Kurve des Szenarios von 50 kg Chlor fällt am rechten Rand bei ca. 300 Todesopfern senkrecht ab. Hierbei handelt es sich um den Staufall. Die Stufe bei ca. 2 Opfern beruht aus der geringeren Zahl an Tunnelnutzern bei flüssigem Verkehr. Aus den Verzweigungen erhöhtes Ausmaß, Tag und Nacht und Fremdrettung ergibt sich der weitere treppenähnliche Verlauf der Kurve.

4.3.5 Risikoermittlung TNT

In Abbildung 4.4 sind die Summenkurven des Leitstoffes TNT dargestellt. Beide Kurven verlaufen unterhalb der Vergleichskurve. Bei beiden Mengen kommt es einmal in ca. 0,77 Millionen Jahren zu einem Ereignis.

Vorab ist anzumerken, dass bei Transporten von Sprengstoffen neben der Menge auch die Empfindlichkeit eine Rolle spielt. So sind Zündschnüre leichter zu Explosion zu bringen als der eigentliche Sprengstoff. Es kann davon ausgegangen werden, dass reines TNT nicht durch Hitze zur Explosion gebracht werden kann, sondern nur durch extremen Druck mit

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

nachfolgender Stoßwelle, die die Explosion unterhält. Um der Komplexität Rechnung zu tragen, wurden zum Schadensausmaß „worst case“ Annahmen getroffen.

Aufgrund der Explosion als Wirkungsart des Leitstoffes kommen alle Personen um, die sich im Tunnel befinden, unabhängig von der transportierten Menge. Es wurde angenommen dass jeweils 50 % auf Transporte mit 100 kg bzw. 1 t entfallen. Damit sind beide Kurven deckungsgleich.

Es wurden eine Reihe weiterer konservativer Annahmen getroffen, so z.B. dass bei verzögerter Zündung alle Personen bis zur Zündung im Tunnel verbleiben und damit umkommen.

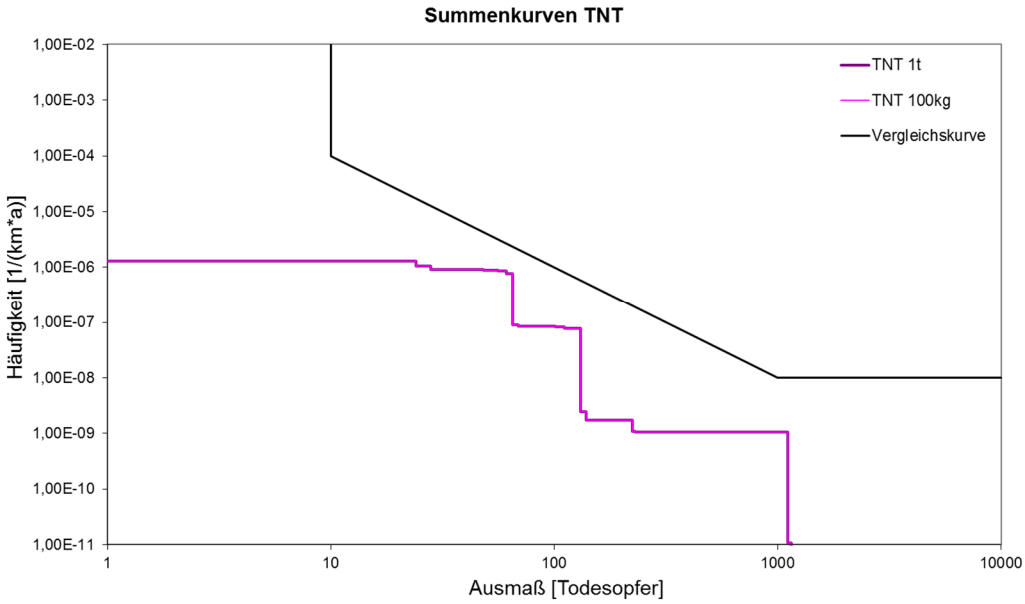


Abbildung 4.4: Summenkurven TNT

Die unterschiedliche Anzahl von Personen im Tunnel bei Einzelereignissen und die Wahrscheinlichkeit der Ereignisverzweigungen Tag/Nach, erhöhtes Ausmaß und Fremdrettung ergeben den treppenartigen Verlauf der Kurven.

4.3.6 Summenhäufigkeitskurve über alle Leitstoffe

In Abbildung 4.5 sind die Summenkurven aller Leitstoffe einzeln dargestellt. Weiterhin ist die resultierende Summenkurve über alle Leitstoffe abgetragen. Insgesamt kommt es einmal in ca. 28500 Jahren zu einem Ereignis mit mindestens einem Todesopfer.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

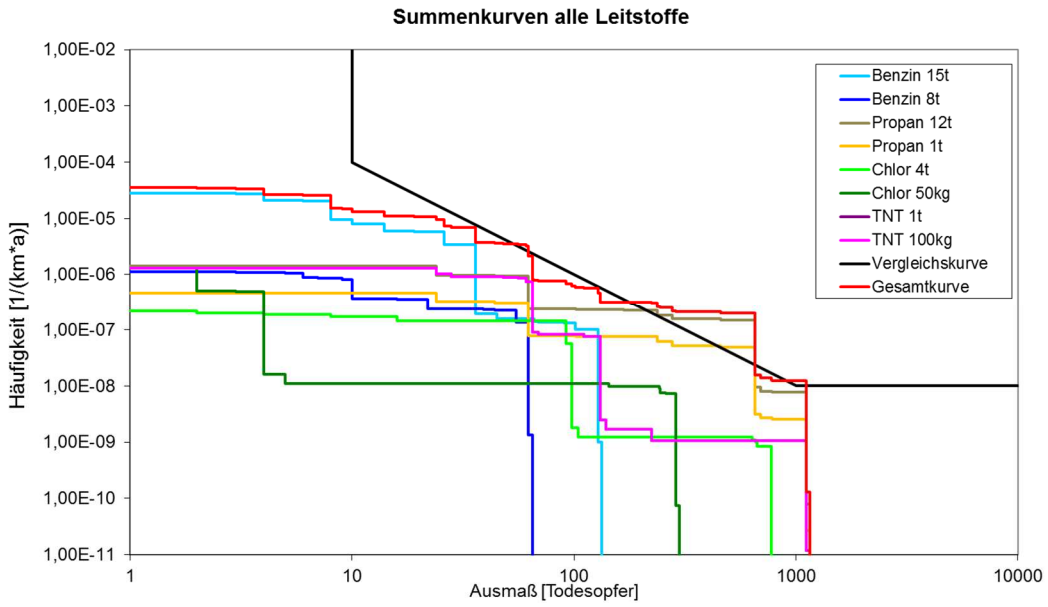


Abbildung 4.5: Summenkurven aller Leitstoffe

Die Gesamtsummenkurve wird im Bereich von niedrigen Schadensausmaßen vom Leitstoff Benzin und im Bereich von hohen Schadensausmaßen vom Leitstoff Propan bzw. TNT dominiert.

Dies lässt sich auf die Unfallhäufigkeit mit dem Leitstoff Benzin aufgrund der hohen Verkehrsbelastung und die hohen Opferzahlen bei TNT- bzw. Propanereignissen zurückführen.

Eine geringere Verkehrsbelastung würde die Gesamtsummenkurve bei gleichem Schadensausmaß „nach unten“ parallel verschieben.

Hinsichtlich des Leitstoffes TNT ist anzumerken, dass die Häufigkeit des Initialereignisses gemäß Verfahren hoch scheint. Damit kommt es zu einer hohen Gewichtung im Verhältnis zu den anderen Leitstoffen.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

5 Empfehlungen

Die resultierende Gesamtsummenkurve verläuft oberhalb der Vergleichsgrenzkurve.

Der Tunnel Leverkusen erfüllt nicht die Anforderungen der Kategorie A und kann damit für den uneingeschränkten Transport von gefährlichen Gütern nicht empfohlen werden. Die Beurteilung bezieht sich auf ein Schadensausmaß, dem der Schadensindikator Todesopfer zugrunde liegt.

Die Auswirkungen der Leitstoffe Propan und TNT sind ausschlaggebend an den Überschreitungen der Grenzkurve beteiligt. Aufgrund der in einen Straßentunnel nicht realisierbaren Detektion von Gefahrgutstoffen (TNT, Chlor, Propan) greifen bei einem Gefahrgutereignisfall keine Sicherheitsmaßnahmen, die die Opferzahlen begrenzen könnten. Aufgrund fehlender Detektion können keine Tunnelsperrung, keine Alarmierung der Tunnelnutzer und keine Aktivierung der Lüftung erfolgen.

Zur Ermittlung der zu vergebenden Kategorie ist der Leitstoff ausschlaggebend, der zu einer Überschreitung der Vergleichsgrenzkurve führt. Im Tunnel Leverkusen liegen die Summenkurven des Leitstoffs Propan mit freigesetzten Mengen von 12 t bzw. 1 t über der Grenzkurve. Nach Tabelle 3.3 bestimmt die freigesetzte Menge von 1 t mit der restriktiveren Kategorie D nach ADR den gesamten Tunnel.

Nach Ausschluss der freigesetzten Mengen der Leitstoffe, die zu einer Beschränkung A - D führen, verläuft die resultierende Gesamtsummenkurve unterhalb der Vergleichsgrenzkurve (vgl. Abbildung 5.1).

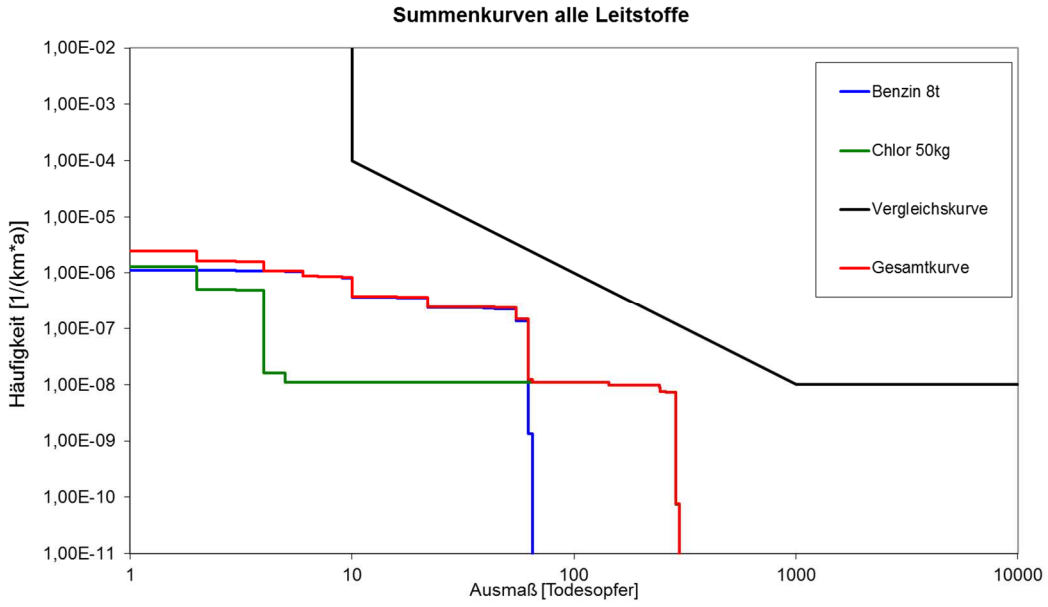


Abbildung 5.1: Summenkurve aller Leitstoffe der Kategorie E

Im Ergebnis des Verfahrens wird empfohlen, den Tunnel Leverkusen der Kategorie D zuzuordnen.

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06

6 Quellenverzeichnis

[1] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, FE 03.0437/2007/FRB, FE 86.0050/2008, Schlussbericht, Oktober 2009

[2] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, FE03.0437/2007/FRB, FE 86.0050/2008, Schlussbericht Anhang, März 2009

[3] Gerlach, T., Kratz, T., Schneider, S.: Machbarkeitsstudie: Zulässigkeit Gefahrguttransporte - Tunnel Leverkusen, Oktober 2015

[4] König, J., Schneider, S.: Anlage T13.1 – Gefahrgutrisikoanalyse ADR Stufe 1b, Oktober 2015

[5] QRAM_DG Version 3.61 2006/07/19

[6] Reference Manual, RESEARCH REPORT N° 20504 Transport of Dangerous Goods through road tunnels Quantitative Risk Assessment Model (versions 3.60 and 3.61) INERIS, WS-ATKINS, IRR, Verneuil-en-Halatte, 01/08/2005

[7] Riess, I., Brandt, R., „ODEM“: A one-dimensional egress model for risk assessment, 5th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 3.-4. Mai 2010, Graz

[8] Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC - World Road Association, Committee on Road Tunnels (C5), 05.05.B, 1999

[9] NIST Special Publication 1019-5 „Fire Dynamics Simulator (Version 5), User’s Guide“, FDS Version 5.3, 18. Februar 2009

[10] NIST Special Publication 1018-5 „Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide“, FDS Version 5.2, 2. Februar 2009

[11] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, RABT, Ausgabe 2006

Copyright © bei Auftraggeber gemäß Urheberrecht / Anlage-T13.2_15-201-002_Leverkusen-A1_ADR-2a_V1.2_2015-10-06