

A1 Ausbau zwischen AK Leverkusen-West und AK Leverkusen:

Machbarkeitsstudie zum Transport von Gefahrgütern im Fall einer Tunnellösung:

Schlussbericht

Auftraggeber:

Stadt Leverkusen
Koordinierungsstelle Autobahnausbau

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. (TH) Stefan Reitenberger
Dipl.-Ing. Univ. Franz-Hubertus Beck
Ingenieurbüro Dipl.-Ing. H. Vössing GmbH, NL Tunnelbau
Düsseldorf

Dr.-Ing. Georg Mayer
Dr.-Ing. Roosbeh Mousavi
Dipl.-Ing. (FH) Sven Brennberger
PTV Transport Consult GmbH
Stuttgart

23. Februar 2017

Dokumentinformationen

Kurztitel	Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1 Leverkusen
Auftraggeber:	Stadt Leverkusen
Auftragnehmer:	ArGe IG (Ing.-büro Vössing/PTV Transport Consult GmbH)
Auftrags-Nr.:	1738
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Stefan Reitenberger, stefan.reitenberger@voessing.de Dipl.-Ing. Franz-Hubertus Beck, franz-hubertus.beck@voessing.de Dr.-Ing. Georg Mayer, georg.mayer@ptvgroup.com Dr.-Ing. Roozbeh Mousavi, roozbeh.mousavi@ptvgroup.com Dipl.-Ing. (FH) Sven Brennberger, sven.brennberger@ptvgroup.com
Version:	V4.0
Autoren:	Stefan Reitenberger, Georg Mayer
zuletzt gespeichert:	23.02.2017
Speicherort:	-

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis	7
1 Einführung.....	9
1.1 Ausgangslage	9
1.2 Aufgabenstellung.....	10
2 Analyse der vorliegenden Grundlagen	11
2.1 Stand der Planung.....	11
2.2 Variantenvergleich.....	12
2.2.1 Methodik des Variantenvergleichs (Synopsis)	12
2.2.2 Variante T01 – Tieflage Südversatz.....	15
2.2.3 Variante T04 – Tieflage Tunnel mit Südversatz	16
2.3 Machbarkeitsstudie: Zulässigkeit Gefahrguttransporte.....	17
2.3.1 Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 1b (T13.1)	18
2.3.2 Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 2a (T13.2).....	27
3 Verbesserungsmaßnahmen	49
3.1 Konstruktive Lösungsmöglichkeiten.....	49
3.1.1 Verkürzung des Notausgangsabstands (Vergleichsuntersuchung Variante 2)	49
3.1.2 Verlängerung der Trennwand zwischen Hauptröhre und Zu-/Abfahrten über gesamte Tunnellänge (Vergleichsuntersuchung Variante 4)	49
3.1.3 Rasterdecken	49
3.2 Betriebstechnische Lösungsmöglichkeiten	51
3.2.1 Verbesserte Detektion.....	51
3.2.2 Löschanlagen	52
3.2.3 Leistungsfähige Absaugeinrichtungen (Lüftung)	52
3.3 Betrieblich, organisatorische Lösungsmöglichkeiten	52
3.3.1 Zulässigkeit von Gefahrguttransporten nur in verkehrsarmen Zeiten (Nachts).....	52
3.3.2 Portalfeuerwehr (Verbesserung der Fremdrettung)	52

4	Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte Tunnelvarianten	53
4.1	Untersuchungsvarianten	53
4.2	Untersuchungsszenarien	53
4.3	Eingangsparameter / Eingangsdaten Stufe 2a / Untersuchungsgrundlagen	55
4.3.1	Tunnelgeometrie	55
4.3.2	Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung.....	58
4.3.3	Lüftung.....	58
4.4	Häufigkeitsermittlung.....	59
4.4.1	Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis	59
4.4.2	Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf.....	60
4.4.3	Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf	62
4.5	Schadensausmaßermittlung.....	63
4.5.1	Ermittlung von Einwirkungen (impacts)	63
4.5.2	Ermittlung von Auswirkungen (consequences)	73
4.6	Risikoermittlung und -bewertung	82
4.6.1	Untersuchungsvariante 0: T01 – NA 138,5 m.....	82
4.6.2	Untersuchungsvariante 1-1: T01 – NA 69 m.....	83
4.6.3	Untersuchungsvariante 1-2: T01 – NA 54,0 m.....	84
4.6.4	Untersuchungsvariante 2: T01 – Trennwand, NA 138,5 m.....	85
4.6.5	Untersuchungsvariante 3: T01 – Trennwand, NA 69 m.....	85
4.7	Zusammenfassung Gefahrgutanalyse	86
5	Abschätzung der Kosten und Realisierbarkeit der vorteilhaften Untersuchungsvarianten.....	88
5.1	Untersuchungsvariante 1-2: T01 – NA 54m	88
5.2	Untersuchungsvariante 3: T01 – durchgehende Trennwand, NA 69m.....	90
6	Zusammenfassung.....	95
	Literaturverzeichnis.....	96

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kölner Autobahnring	9
Abbildung 2:	Konzeption der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden (nach DIN EN 15643-1)	14
Abbildung 3:	Tunnelbauwerk T01 inkl. Trogbauwerke (Quelle: 1-053-301_LP_45735_b).....	16
Abbildung 4:	Modell zur Durchführung einer Gefahrgutrisikoanalyse nach Stufe 2a	27
Abbildung 5:	Beispiel für einen Ereignisbaum (Mayer, Baltzer 2003)	28
Abbildung 6:	Beispiel eines HA-Diagramms.....	32
Abbildung 7:	Vergleichskurve	33
Abbildung 8:	Beispiel einer Risikobewertung zur Kategorisierung nach ADR	34
Abbildung 9:	Prinzipskizze Entrauchungsschacht U-Bahnhof.....	51
Abbildung 10:	6-streifiger Querschnitt ohne Trennwand (Quelle: StraßenNRW).....	56
Abbildung 11:	4+2-streifiger Querschnitt mit Trennwand (Quelle: StraßenNRW).....	57
Abbildung 12:	Anordnung der Strahlventilatoren bei geplanter Trennwand.....	59
Abbildung 13:	Anordnung der Strahlventilatoren bei verlängerter Trennwand	59
Abbildung 14:	3D-Modellierung des Tunnels Leverkusen	64
Abbildung 15:	Darstellung einer spontanen Freisetzung von Benzin im Tunnel Leverkusen (Nordröhre.....	65
Abbildung 16:	Berechnete Rauchausbreitung infolge eines Benzinbrandes bei spontaner Freisetzung bei freiem Verkehr im Tunnel Leverkusen	66
Abbildung 17:	Darstellung einer spontanen Freisetzung von Propan im Tunnel Leverkusen.....	67
Abbildung 18:	Berechnete Temperaturen infolge eines Freistrahlsbrandes bei kontinuierlicher Propanfreisetzung (30 kg/s) und Stau im Tunnel Leverkusen	68
Abbildung 19:	Darstellung der kontinuierlichen Freisetzung von Chlor im Tunnel Leverkusen.....	69
Abbildung 20:	Berechnete Konzentrationen infolge einer spontanen Chlor-Freisetzung bei Stau.....	70
Abbildung 21:	Detonation.....	71
Abbildung 22:	Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 100 kg TNT bei Detonationsbeginn (3ms)	72
Abbildung 23:	Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 100 kg TNT bei Detonationsbeginn (10 ms)	72

Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte (Mayer, 2006)	74
Abbildung 25: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen im Tunnel Leverkusen infolge einer spontanen Freisetzung von Benzin an einem Notausgang bei freiem Verkehr (Notausgangsabstand 138,5 m)	75
Abbildung 26: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung (Mayer, 2006).....	76
Abbildung 27: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen infolge eines Freistrahbrandes im Tunnel Leverkusen an einem Notausgang bei Stau (Notausgangsabstand 138,5 m).....	77
Abbildung 28: Letalitäten infolge Chlorexposition	78
Abbildung 29: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen infolge einer Chlorfreisetzung im Tunnel Leverkusen an einem Notausgang bei Stau (Notausgangsabstand 138,5 m).....	79
Abbildung 30: Personenschäden infolge Überdrucks.....	80
Abbildung 31: Entfernungsabhängiger Verlauf des Drucks im Tunnel Leverkusen (100 kg Ladung)	81
Abbildung 32: Entfernungsabhängiger Verlauf des Drucks im Tunnel Leverkusen (1t Ladung)	81
Abbildung 33: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %	82
Abbildung 34: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 69 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %.....	83
Abbildung 35: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 54,0 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %.....	84
Abbildung 36: Summenkurve für den Leitstoff Benzin für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %	85
Abbildung 37: Summenkurve für den Leitstoff Benzin für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 69 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %	86
Abbildung 38: Vergleichsuntersuchung Variante 1-2 - Schematischer Querschnitt mit Notausgang zwischen den Tunnelröhren.....	89
Abbildung 39: Streckenlängen zwischen AK Leverkusen West und Tunnelportal.....	90

Abbildung 40: Vergleichsuntersuchung Variante 03 - Schematischer Querschnitt mit Trennwänden, Notausgängen zwischen den Tunnelröhren und an die Oberfläche	91
Abbildung 41: Variante 3 - Zusätzliche Flächeninanspruchnahme und Kollisionen	92
Abbildung 42: Variante 3 – baubetriebliche und konstruktive Folgen unter Beibehaltung Lage südliche Außenwand	92
Abbildung 43: Variante 03 mit Nordversatz (T02) - baubetriebliche und konstruktive Folgen	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Planungsgrundlagen	11
Tabelle 2:	Kriterien für Variantenvergleich	13
Tabelle 3:	Eingangswerte zur Modellierung des Tunnels Leverkusen in QRAM	20
Tabelle 4:	Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM	21
Tabelle 5:	Eingangsparameter Unfallrate	22
Tabelle 6:	Standard Gefahrgutverteilung für Deutschland bei der Anwendung von QRAM	22
Tabelle 7:	Übersicht der mit QRAM abbildbaren Szenarien	24
Tabelle 8:	Grenzwerte und Szenarien zur Bewertung des Risikos mit OECD/PIARC QRAM	25
Tabelle 9:	Vergleichende Gegenüberstellung von zulässigem und berechnetem EV-Wert	26
Tabelle 10:	Vergleichende Gegenüberstellung der in Stufe 2a geforderten und verwendeten Modelle	35
Tabelle 11:	Vergleichende Gegenüberstellung der in Stufe 2a geforderten und verwendeten Verkehrswerte	36
Tabelle 12:	Freisetzungsraten der betrachteten Gefahrgutklassen für Bundesautobahnen	36
Tabelle 13:	Berücksichtigung weiterer Stoffe mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. möglichen Wirkungen an den Leitstoffen	37
Tabelle 14:	Leitstoffbezogene Freisetzungshäufigkeiten je Röhre für den Tunnel Leverkusen	38
Tabelle 15:	Wahrscheinlichkeit der Freisetzungsort	39
Tabelle 16:	Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei spontaner Freisetzung	39
Tabelle 17:	Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei kontinuierlicher Freisetzung	40
Tabelle 18:	Untersuchungsszenarien zur Abbildung der Kategorien gemäß ADR	43
Tabelle 19:	Vorgegebene und berücksichtigte Benzinfreisetzungsszenarien in Stufe 2a	44
Tabelle 20:	Vorgegebene und berücksichtigte Propanfreisetzungsszenarien in Stufe 2a	45
Tabelle 21:	Vorgegebene und berücksichtigte Chlorfreisetzungsszenarien in Stufe 2a	46
Tabelle 22:	Vorgegebene und berücksichtigte TNT-Umsetzungsszenarien in Stufe 2a	46

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Tabellenverzeichnis

Tabelle 23:	Zu betrachtende Untersuchungsszenarien	54
Tabelle 24:	Zusammenstellung der maßgebenden Verkehrswerte.....	58
Tabelle 25:	Leitstoffbezogene Freisetzungshäufigkeiten je Röhre für den Tunnel Leverkusen.....	60
Tabelle 26:	Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf.....	61
Tabelle 27:	Anzahl Endzustände	62
Tabelle 28:	Kostendifferenz Variante 1-2 (T01 nach MB-Studie; Notausgangsabstand a~54 m).....	88
Tabelle 29:	Kostendifferenz Variante 3 (durchgezogene Mittelwand; Notausgangsabstand a~69 m).....	93

1 Einführung

1.1 Ausgangslage

Die Autobahnen A1, A3 und A4 bilden im Bereich der Stadt Köln den Kölner Autobahnring. Dieser ca. 52 km lange Autobahnring gehört mit einem DTV von bis zu 170.000 Kfz/24h zu den höchstbelasteten und stauanfälligsten Autobahnabschnitten in Deutschland. Aufgrund der hohen Verkehrsbelastung erfolgt der sukzessive 6- bzw. 8-streifige Ausbau des Autobahnringes. Der Abschnitt der A4 zwischen dem AK Köln-West und dem AD Heumar ist bereits vollständig 6-streifig ausgebaut. Die A3 ist zwischen dem AD Heumar und der AS Mühlheim seit 2012 8-streifig ausgebaut. Derzeit erfolgt der 8-streifige Ausbau bis zum AK Leverkusen. Mit Fertigstellung der Einhausung Lövenich weist die A1 durchgängig 6 Fahrstreifen zwischen dem AK Köln-West und dem AK Leverkusen auf. Zwischen der AS Köln-Niehl und dem AK-Leverkusen ist beabsichtigt, die A1 achtstreifig auszubauen. Nachfolgende Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Elemente des Kölner Autobahnringes. Der beabsichtigte zwölfstreifige Ausbau der A1 zwischen der AS Köln-Niehl und dem AK Leverkusen ist darin in rot markiert dargestellt.

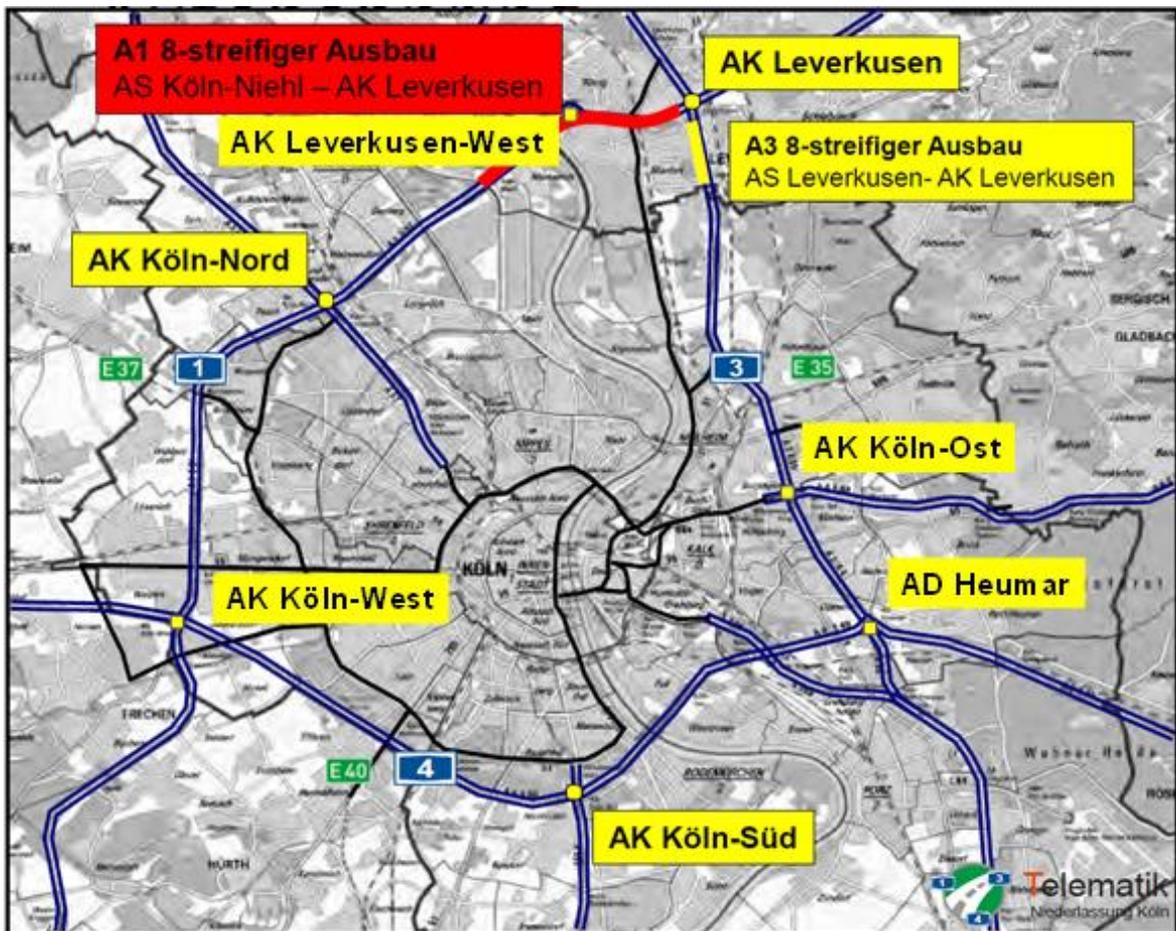


Abbildung 1: Kölner Autobahnring

Derzeit wird die A1 im Bereich zwischen dem AK Leverkusen-West und dem AK Leverkusen (Planungsabschnitt 3) in Hochlage auf Brücken geführt. Im Zuge eines Variantenvergleichs sollte frühzeitig eine mögliche Vorzugsmaßnahme zur Realisierung ermittelt werden. Dazu wurden durch den Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen, kurz Straßen.NRW, 5 Brücken-, 7 Tunnelvarianten sowie eine Trog- und eine kombinierte Variante Brücke/Tunnel im Tiefgang einer Machbarkeitsstudie untersucht. Nach einer qualitativen Bewertung diverser Kriterien verblieben lediglich drei Vorzugsvarianten, welche eine Brücken (H02) und zwei Tunnellösungen (T01 und T04) umfassen.

Parallel zum Variantenvergleich wurde eine allgemeine Gefahrgutanalyse für die Tunnelvarianten durchgeführt. Die Tunnelvarianten erreichen danach eine Gefahrgutkategorisierung nicht besser als Stufe D, wodurch einige Gefahrgüter vom Transport durch die Tunnel auszuschließen sind. Aus diesem Grund erscheint die Wahl einer Tunnelvariante als Vorzugsvariante in den weiteren Untersuchungen als unwahrscheinlich.

1.2 Aufgabenstellung

Die Stadt Leverkusen möchte den frühzeitigen Ausschluss möglicher Tunnelvarianten in dem 3. Planungsabschnitt vor Beginn der Vorplanung näher überprüfen lassen, da sie eine zusätzliche Belastung für die Anwohner in der Brückenvariante durch erhöhte Geräuschemissionen und aus einer zusätzlichen Verbauung (breitere Brückenstelze) erkennt. Außerdem wirkt das Stadtbild bereits heute durch die vorhandene Brückenstelze zerschnitten und erzeugt eine soziale Teilung der Stadt. Die Stadt Leverkusen erhofft sich positive Entwicklungseffekte durch die Führung der A1 in diesem Bereich in einen Tunnel unter die Erde.

Aus diesen Gründen wird in dem vorliegenden Bericht zunächst eine Analyse der vorhandenen Planungen (Variantenvergleich und Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte durchgeführt und nach Verbesserungspotenzialen für die Tunnelvarianten in konstruktiver sowie betrieblich-organisatorischer Sicht bzgl. der Gefahrgutproblematik gesucht.

Des Weiteren wird die vorliegende Analyse für die Tunnelvarianten der Machbarkeitsstudie einschließlich der Bewertung nach Stufe 2a des Verfahrens zur Kategorisierung von Straßentunneln gem. ADR im Hinblick auf die zugrundeliegenden Eingangsparameter sowie der gewählten Untersuchungsmethodik und die Bewertung der Untersuchungsergebnisse kritisch geprüft.

Ein aus den verbesserten Konstruktionsoptionen entwickeltes Tunnelbauwerk wird einer erneuten Gefahrgutanalyse nach ADR Stufe 2a mit möglicherweise weiteren angepassten Eingangsparametern unterzogen.

2 Analyse der vorliegenden Grundlagen

2.1 Stand der Planung

Zum Zeitpunkt dieses Berichtes lagen die Unterlagen zur Planung im 3. Abschnitt gemäß Tabelle 1 vor. Diese umfassen im Wesentlichen einen synoptischen Variantenvergleich, die Machbarkeitsstudie Gefahrstoffgutachten Tunnel Leverkusen in der Version 1.4 mit Anlagen und einzelne Planunterlagen.

Unterlagen	Erstellung
Variantenvergleich (Synopsis)	Ende 2015
Machbarkeitsstudie Gefahrstoffgutachten – Tunnel Leverkusen (V1.4)	21.01.2016
T10: verkehrstechnisches Gutachten (Fortschreibung Bemessung 2030 – 50. Std.)	xx.11.2014
T13.1: Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 1b	06.10.2015
T13.2: Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 2a	06.10.2015
T13.3: Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 2a Tag/Nacht	06.10.2015
K2: Lageplan 1-042-201_LP_45735_a – Südversatz mit Teilabbruch	15.01.2015
K3.1: Höhenplan 1-042-211_HP_45735_a – Südversatz mit Teilabbruch (RF Do)	15.01.2015
K3.2: Höhenplan 1-042-212_HP_45735_a – Südversatz mit Teilabbruch (RF Ko)	15.01.2015
K4.1: Querschnitt 6 Fahrstreifen (Blicht =26,0m)	22.12.2014
K4.2: Querschnitt 4+2 Fahrstreifen (B = 32,0m, mit Trennwand)	22.12.2014
K5: Lageplan verkehrstechnische Einrichtungen – Südversatz mit Teilabbruch	22.02.2015
K6: Bauphasen 1-142-004_SQ_45735_a – Südversatz mit Teilabbruch	05.12.2014
K7: LP+HP BAB A3, 8-streifiger Ausbau mit Tieflage A1, Variante 3	xx.04.2015
K8: Lageplan 1-043-301_LP_45735_c – Tieflage Trog mit Teilabbruch (Rasterdecke)	06.01.2015
S1: Kostenübersicht betriebliche Ausrüstung	25.08.2015
Lageplan: 1-053-301_LP_45735_b – T01, Tieflage Südversatz	30.10.2015
Bauphasen: 1-161-301_QV_457353_a – Verkehrsführung T01, Tieflage Südversatz	11.09.2015

Tabelle 1: Planungsgrundlagen

Im Laufe der Bearbeitung wurden ergänzende Unterlagen zu den untersuchten Bauabläufen der Tunnelvarianten T01 (Südversatz), T02 (Nordversatz), T03 (Nord-Südversatz) und T04 (Tunnel Südversatz mit Teilabbruch), Rückbaukonzept der Stelzenautobahn und Herstellkosten der Tunnelvariante T01 durch Straßen.NRW übergeben.

Nachfolgend werden die Grundlagen zum Variantenvergleich und der Machbarkeitsstudie sowie dem Gefahrstoffgutachten näher betrachtet.

2.2 Variantenvergleich

Der vorliegende Variantenvergleich als Synopse weist neben der Vorzugsvariante H02 „Hochlage Südversatz mit Querverschub“ noch die Tunnelvarianten T01 „Tieflage Südversatz“ und T04 „Tunnel Südversatz mit Teilabbruch“ vor, die neben elf verworfenen Varianten vertieft untersucht wurden. Dies erfolgte durch Bestimmung der Herstellkosten dieser Varianten. Nachfolgend wird zunächst versucht die erkennbare Methodik des Variantenvergleichs kritisch zu hinterfragen, bevor die baulichen Merkmale der beiden Tunnelvorzugsvarianten beschrieben werden, um Ansatzpunkte zur Erarbeitung von Lösungsmöglichkeiten bezüglich des Gefahrstoffgutachtens zu erhalten.

2.2.1 Methodik des Variantenvergleichs (Synopse)

Der Umfang und inhaltliche Tiefgang der vorliegenden Synopse unter Berücksichtigung der weiteren Grundlagen weist sämtliche Eigenschaften an die Ermittlung einer Vorzugsvariante gemäß HOAI Leistungsphase 2 auf. Es wurden maßgebliche Querschnitts-, Lage- und Höhenpläne (nicht für jede Variante vorliegend) sowie Vorüberlegungen zu groben Bauabläufen und Bauphasen je Variante erarbeitet. Qualitative und quantitative Entscheidungskriterien für einen validen Variantenvergleich wurden aufgestellt. In Tabelle 2 wird versucht, die vorliegenden Entscheidungskriterien inhaltlich abzugrenzen und hinsichtlich ihrer Messbarkeit (qualitativ oder quantitativ) sowie der Betroffenheit (für wen ist das Kriterium von Bedeutung) einzuordnen.

Die in dem Variantenvergleich aufgeführten Merkmale sollten die Grundlage für einen soliden Variantenentscheid liefern, der durch die Eingrenzung auf drei vertieft betrachtete Varianten in einer ersten Stufe erfolgt. Tatsächlich sind die zur Abgrenzung führenden Argumente nicht ausführlich und objektiv nachvollziehbar beschrieben. So wurden von den zehn verworfenen Varianten sieben mit Verweis auf „Eingriff in die Bebauung“ oder drei mit Verweis auf „risikoreiche und aufwendige Bauverfahren“ von einer näheren Untersuchung ausgeschlossen. Es ist nicht vermerkt, ob positive Effekte der verworfenen Varianten in anderen Merkmalen Berücksichtigung bei der Entscheidung fanden.

Merkmale der Varianten	Inhalt	Messbarkeit	Betroffenheit
Trassierung	Beschreibung der Anordnung der Trassenvariante und Auswirkungen auf den Verkehrsfluss (z.B. Mindestradius)	qualitativ	Anlieger, Autofahrer (Verkehrsfluss)
Verkehrssicherheit	qualitative Bewertung der Verkehrssicherheit	qualitativ	Autofahrer
Eingriffe in Wohnnutzung	liegt durch die betrachtete Variante eine räumliche Einengung oder Flächeninanspruchnahme des Grundbesitzes der Privatanwohner vor	teil quantitativ / qualitativ	private Anlieger
Eingriff in Hotelnutzung	liegt durch die betrachtete Variante eine räumliche Einengung oder Flächeninanspruchnahme des Grundbesitzes des Hotels vor	teil quantitativ / qualitativ	gewerblicher Anlieger
Sportanlagennutzung	Erreichbarkeit und verkehrliche Einschränkungen der Sportanlagen / nur Bewertung Bauzustand	qualitativ	Anlieger öffentlichen Interesses
Umweltverträglichkeit	Auswirkungen auf Schutzgut Mensch und Natur hinsichtlich Lärmimmissionen und zusätzlicher Luftverschmutzung	quantitativ? (keine Untersuchungen vorliegend)	Sämtliche Anlieger
Bauablauf	grobe technische Machbarkeit bei allen Varianten aufgezeigt – Bewertungskriterium?	qualitativ???	Sämtliche Anlieger, DB
Risiko Bauverfahren	Aufzählung der wesentlichen eingesetzten Bauverfahren je Variante – Risikobewertung nicht nachvollziehbar abgegrenzt	qualitativ???	AG, DB
Bauzeit	grobe Bauzeitschätzung	quantitativ	Sämtliche Anlieger, AG
Behelfsverkehrsführung	Auswirkungen bauzeitlicher Verkehrsbeeinträchtigungen	qualitativ	Anlieger, DB, Autofahrer
Wirtschaftlichkeit	Auflistung nicht zusammenhängender Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Variante	qualitativ	AG

Tabelle 2: Kriterien für Variantenvergleich

Bei infrastrukturellen Großprojekten, wie dem zukünftigen Ingenieurbauwerk A1, werden üblicherweise zum Variantenvergleich Bewertungsverfahren eingesetzt, wie ein einfaches oder gewichtetes Rangordnungsverfahren oder ein belastbareres aber aufwendigeres Nutzwert- oder Sensitivitätsverfahren. Wesentliches Ziel stellt die Findung einer optimalen Vorzugsvariante dar, die unter Berücksichtigung objektiver und umfänglicher Bewertungskriterien, die oft konfliktär bzw. gegensätzlich sind, alle anderen Varianten dominiert. Insbesondere qualitative Kriterien, die zunächst häufig nur nominal beschrieben werden können (wie z.B. Verkehrssicherheit, Eingriffe in Wohn- und Hotelnutzung, Risiko von Bauverfahren etc.) sind dabei in geeignete Hilfs- oder künstliche Ersatzgrößen (wie z.B. Unfälle/km, Erhöhung Lärmbeanspruchung, reduzierte

Nutzflächen, Schadensfälle je Mengeneinheit Bauverfahren oder allgemein Nutzen) umzuwandeln. Diese Hilfsgrößen ermöglichen einen quantitativen Vergleich der Kriterien untereinander. Nähere Ausführungen zu multikriteriellen Entscheidungsproblemen und Bewertungsverfahren können z.B. Klein und Scholl (2011) entnommen werden.

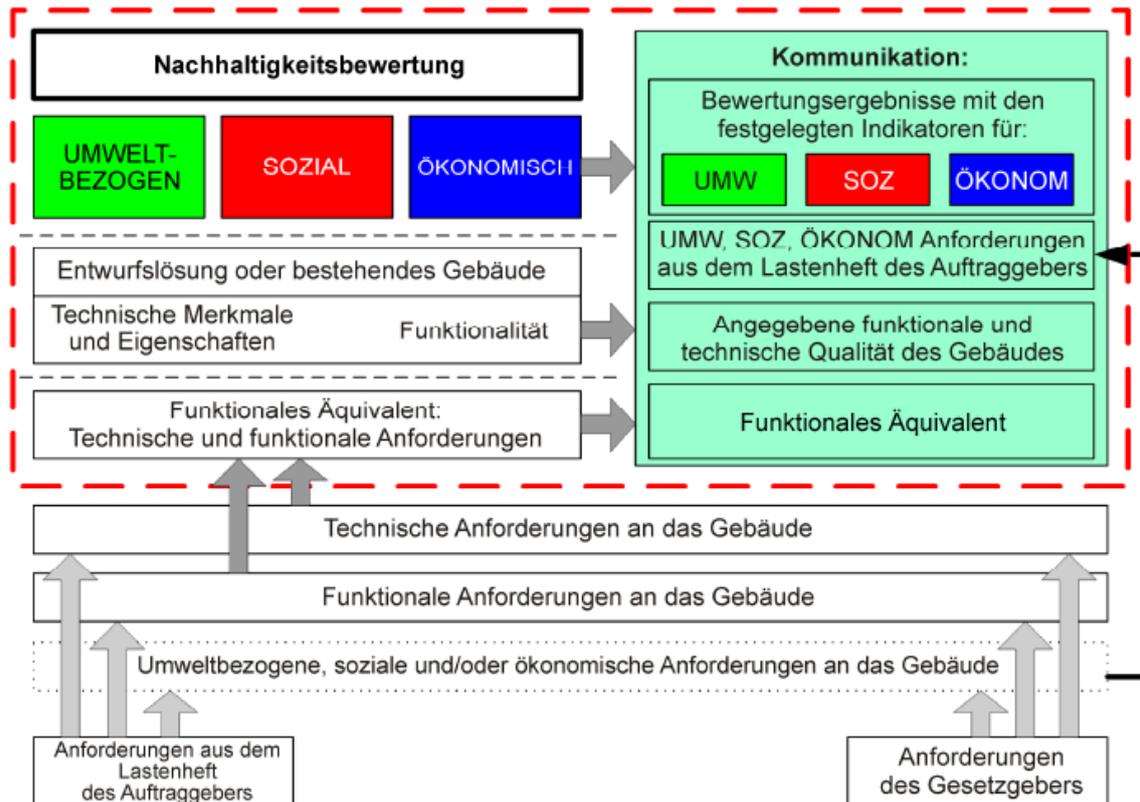


Abbildung 2: Konzeption der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden (nach DIN EN 15643-1)

Mit Einführung der Normenreihe DIN EN 15643, Teile 1 bis 4 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden“ steht ein umfängliches, allgemeingültiges Bewertungskonzept hinsichtlich umweltbezogener, sozialer und ökonomischer Kriterien zur Verfügung (vgl. Abbildung 2). Die Quantifizierung der jeweiligen Kriterien erfolgt über die künstliche Kenngröße „funktionales Äquivalent“ und verspricht somit eine gesamthafte Bewertung eines Gebäudes hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien. Nachdem dieses Verfahren für Gebäude des Hochbaus und Verwaltungsgebäude durch das BMVI im Rahmen seiner Initiative „Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ erfolgreich eingeführt wurde, ließ es durch die Bundesanstalt für Straßenwesen prüfen, ob eine generelle Übertragung auch auf Infrastrukturmaßnahmen im Straßenbau möglich ist. Dies konnte in dem Forschungsprojekt FE 09.0179/2011/MRB grundsätzlich bestätigt werden, dessen Erkenntnisse im Heft B 133 der Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen zusammengefasst wurde. Die Vorgehensweise wurde in dem „Leitfaden Nachhaltige Infrastruktur“ zusammengefasst und könnte im Zuge des

Variantevergleichs der Vorplanung eingesetzt werden. Darüber hinaus bietet der Leitfaden Verbesserungsempfehlungen hinsichtlich verschiedener Bauwerke und Nachhaltigkeitskriterien.

Der Variantenvergleich zur A1 bei Leverkusen lässt in der vorliegenden (und möglicherweise unvollständigen) Form in mehrfacher Hinsicht einen objektiven und umfangreichen Kriterienvergleich vermissen, so dass die Ausgewogenheit des Ergebnisses hinsichtlich der Kriterien fragwürdig erscheint. Eine Überprüfung der Varianten nach einem objektiveren quantitativen Verfahren würde möglicherweise zu anderen Vorzugsvarianten führen.

2.2.2 Variante T01 – Tieflage Südversatz

2.2.2.1 Lage und Trassierungsverlauf

Die Variante T01 beginnt im Osten an dem neukonzipierten AK Leverkusen A1/A3. Diese schließt mit bis zu 300 m langen Trogbauwerken an den verschiedenen Fahrstreifen des AK an. Die Gradienten der Hauptfahrbahn fällt im Trogbereich mit 3,0 % ab, so dass das Portal des neuen Tunnels vor der Bismarckstraße angeordnet ist. Hinter dem Portal erstreckt sich der 970 m lange Tunnel mit 0,35 % Gefälle, der erst hinter der Bahnstrecke im Westen endet. Der anschließende etwa 260 m lange Trog führt mit 4,0 % Steigung wieder an die Oberfläche und schließt an den im Planungsabschnitt 1 (neue Rheinbrücke) geänderten Verlauf des Anschlusses A59 an.

Allgemein verläuft die neue Trasse zur vorhandenen Situation um rund 32 m nach Süden versetzt. Es reicht somit im Bauzustand bis zu 2 m an das Hotel am Fußballstadion heran.

2.2.2.2 Regelquerschnitte

Das neue Tunnelbauwerk besitzt zwei Sonderquerschnitte nach RABT. Der 6-streifige Querschnitt inkl. einem Seitenstreifen und beidseitigen Notgehwegen besitzt eine lichte Breite von 26,0 m (vgl. Anlage K4.1). Ein zweiter Regelquerschnitt mit 4+2 Fahrstreifen mit Trennwand liegt in den Zu- bzw. Ausfahrten zum AK Leverkusen vor. Die lichten Breiten betragen hier etwa 19,0 m (4-streifig) und 12,0 m (2-streifig) (vgl. Anlage K4.2). Damit weist das neue Bauwerk vereinfachend die doppelte Kapazität gegenüber der bisherigen Verkehrsführung auf.

2.2.2.3 Tunnelbauwerk

Die Röhren der beiden Richtungsfahrbahnen des neuen Tunnelbauwerks grenzen bis auf eine mächtige Mittelwand, die bauzeitlich auch als Verbauwand genutzt wird, unmittelbar aneinander an. Dies ermöglicht Rettungszuwegungen für den Ereignisfall in die Nachbarröhre. Zusätzlich sind an den Außenwänden Rettungsbauwerke an die Oberfläche in einem mittleren Abstand von rund 135 m vorgesehen.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Analyse der vorliegenden Grundlagen

Während in Fahrtrichtung Koblenz der RQ 4+2 zu einer etwa 275 m langen Trennwand führt, erstreckt sich diese in Fahrtrichtung Dortmund über etwa 545 m.

Der grobe Bauablauf (vgl. Plan 1-161-301_QV_45735_a) erfolgt in einem ersten Schritt in der Errichtung des südlichen Tunnelbauwerkes. Anschließend wird der Verkehr von den Brücken im Gegenverkehr á drei Fahrstreifen in den ersten Tunnelabschnitt verlegt und die Stelzenautobahn kann zurückgebaut werden. Danach kann das nördliche Tunnelbauwerk errichtet werden, bevor der Verkehr in den endgültigen Zustand umverlegt wird und die Oberfläche neu gestaltet wird. Die Bauzeit beträgt etwa 8 Jahre.



Abbildung 3: Tunnelbauwerk T01 inkl. Trogbauwerke (Quelle: 1-053-301_LP_45735_b)

2.2.2.4 Betriebstechnische Ausrüstung

Nähere Festlegungen zur betriebstechnischen Ausstattung wurden noch nicht getroffen. Lediglich für die Tunnellüftung wurde angenommen, dass eine mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren je Tunnelröhre zum Einsatz kommen würde. Mögliche Abluftanlagen wurden im Lageplan angedeutet. Alternative Lüftungskonzepte oder sonstige sicherheitserhöhende betriebliche Ausstattungen wurden nicht vorgesehen bzw. nicht berücksichtigt.

2.2.3 Variante T04 – Tieflage Tunnel mit Südversatz

Zur Vorzugsvariante T04 liegen keine näheren Planunterlagen vor. Aus dem Querschnitt des Variantenvergleichs und den Ausführungen zu den jeweiligen Merkmalen lässt sich allerdings ableiten, dass diese Variante im Endzustand im Wesentlichen identisch mit der Variante T01 zu sein scheint. Sie liegt lediglich um 12 m weiter nach Norden versetzt. Der Bauablauf erfordert

dazu einen Teilabbruch der bestehenden Hochstraße und führt somit zu veränderten Bauabläufen, die auch zu einer längeren Bauzeit führen (10 Jahre).

Hinsichtlich der hier gegenständlichen Sicherheitsbewertung für Gefahrguttransporte wird im Weiteren deshalb nur Bezug auf die Variante T01 genommen. Die Ergebnisse sind grundsätzlich hinsichtlich des Endzustands auf vergleichbare Tunnelvarianten (wie auch die Variante T04) übertragbar.

2.3 Machbarkeitsstudie: Zulässigkeit Gefahrguttransporte

Aus dem Transport von gefährlichen Gütern (GGVSEB)¹ und diesen Gütern vergleichbaren Beladungen können bei deren Frei- bzw. Umsetzung Situationen entstehen, die mit Hilfe der technischen Ausrüstung eines Tunnels sowie durch Rettungsdienste nur schwer oder auch überhaupt nicht beherrschbar sind. Die Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz² sowie die Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)³ sehen daher eine Risikobetrachtung hinsichtlich der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten in Tunneln vor. Um entsprechend dem Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR⁴) eine einheitliche Kennzeichnung zu erhalten, hat die Bewertung und Einteilung von Tunneln nach dem „Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007“⁵ zu erfolgen. Dieses Verfahren basiert auf der Quantifizierung von Gefahrgutrisiken und ist zweistufig aufgebaut.

In der ersten Stufe ist mittels einer Grobbeurteilung in zwei Schritten ein Tunnel dahingehend zu überprüfen, 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 in einer zweiten Stufe vertieft untersucht werden.

In dieser vertieften Analyse der Stufe 2 ist in einem ersten Schritt (Stufe 2a) zunächst das intrinsische Risiko des Tunnels mit erweiterten Modellen und verfeinerten Eingangsdaten zu bestimmen. Ergibt sich aufgrund dieser detaillierten Risikobetrachtung eine Beschränkung hinsichtlich des Transports von Gefahrgütern, sind die betroffenen zu transportierenden Güter über eine Umfahrungsstrecke zu leiten. In einem zweiten Schritt (Stufe 2b) ist dann nachzuweisen, dass eine Umfahrungsstrecke die aus der Umlegung resultierenden zusätzlichen Gefahrgutrisiken aufnehmen kann.

¹ Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahnen und Binnengewässer- GGVSEB, BGBl I/2013 Nr. 4 vom 06.02.2013

² Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz

³ Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2016): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln

⁴ Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR 2013), BGBl II / 2013 / S. 648

⁵ Baltzer, W., Imhof, D., Mayer, G., Riepe, W., Zimmermann, U., Zulauf, Ch. (2009): Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Für die Tunnelvariante T01 zum Ausbau der A1 zwischen dem AK Leverkusen-West und dem AK Leverkusen wurde die Zulässigkeit von Gefahrguttransporten bereits nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR in den Stufen 1 und 2a überprüft. Die bisher durchgeführten Analysen kommen zu dem Schluss, dass der Tunnel Leverkusen der Gefahrgutkategorie D zuzuordnen ist, und somit lediglich der Transport von gefährlichen Gütern zulässig ist, die kleine Brände bzw. eine geringe Freisetzung toxischer Substanzen bewirken können.

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen im Hinblick auf die verwendeten Verfahren und Modelle sowie den zugrundeliegenden Eingangsparameter analysiert und bewertet.

2.3.1 Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 1b (T13.1)

Ziel der Stufe 1b ist es, mit einfachen Verfahren und Methoden festzustellen, ob ein Tunnel für den Transport von Gefahrgütern freigegeben werden kann. Die hierzu erforderlichen und verwendeten Grundlagen und Modelle werden nachfolgend kurz beschrieben.

2.3.1.1 Modell Stufe 1b

Die Überprüfung der Tunnelvariante T01 auf die Zulässigkeit von Gefahrguttransporten erfolgte mit dem in der Stufe 1b nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln zu verwendenden „Quantitative Risk Assessment Model“ (QRAM). Hierbei handelt es sich um ein Modell, das im Auftrag der OECD⁶ und der PIARC⁷ zur Bewertung von Straßenzügen hinsichtlich ihrer Risiken infolge von Gefahrgutfreisetzungen entwickelt wurde. Im Vordergrund stand hierbei eine weiträumige Betrachtung von Streckenabschnitten um Alternativrouten für Gefahrguttransporte ableiten zu können. Zur Berechnung der Wirkungen von Gefahrgutfreisetzungen kommen unterschiedliche Modelle für Strecken im Freien und in Tunneln zum Einsatz. Im Bereich der freien Strecke werden zweidimensionale Ausbreitungsmodelle verwendet, die für jeden Streckenabschnitt die Berücksichtigung der zugehörigen Gebietscharakteristik, wie zeitabhängige Einwohnerdichte, Struktur, Windverteilung etc., erlauben. Für Tunnelstrecken erfolgt die Wirkungsberechnung dagegen lediglich mit einem einfachen eindimensionalen Ausbreitungsmodell, mit dem nur näherungsweise Einflüsse aus der Tunnelgeometrie (Gewölbe- und Rechteckquerschnitte), der Lüftung sowie weitere Sicherheitsausstattungen (Entwässerung, Notausgänge etc.) abbildbar sind. Zur Berücksichtigung verkehrlicher Einflüsse können für jeden Streckenabschnitt Verkehrsaufkommen (DTV), Verkehrszusammensetzung, Gefahrgutanteile, Unfalldaten etc. definiert werden.

⁶ OECD: Organisation for Economic Cooperation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)

⁷ PIARC: Permanent International Association of Road Congresses (Weltstraßenverband)

2.3.1.2 Eingangsdaten Stufe 1b

TUNNELMODELLIERUNG

Zur Abbildung eines Tunnels in QRAM müssen Angaben im Hinblick auf seine Betriebsart, die geometrische Ausbildung im Längs- und Querschnitt, dem Lüftungssystem sowie weiteren Sicherheitseinrichtungen gemacht werden. Da in QRAM lediglich einzelne, durchgängige Röhren ohne Verzweigungen innerhalb der Tunnelstrecke abbildbar sind, wurden die Haupt- sowie die Zu- bzw. Abfahrtsröhren des Tunnels Leverkusen als eine Röhre mit 6 Fahrstreifen ohne Trennwand modelliert. Gegenüber einer Röhre mit Untergliederung durch eine Trennwand sind dadurch höhere Schadensausmaße zu erwarten, da durch die fehlende Trennwand der schützende Effekt vor Einwirkungen infolge von Druck, Wärme, Schadgasen und Rauch entfällt. Solange dadurch die verfahrensmäßig festgesetzten Schwellwerte unterschritten werden, führt diese äußerst konservative Annahme in der Stufe 1b zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Eingangswerte zur Modellierung des Tunnels Leverkusen in QRAM, enthält nachfolgende Tabelle 3.

Parameter Tunnel		Standardwerte	Gewählte Werte
Betriebsart		RV oder GV	RV
Tunnellänge		Beliebig	970 m
Längsneigung (gemittelt)		Beliebig	-1,34 % bis 1,42 %
Tunnelquerschnitt	Anzahl Röhren	1 oder 2	2
	Anzahl Fahrstreifen je Röhre	Beliebig	6
	Querschnittsausbildung	Gewölbequerschnitt	-
		Rechteckquerschnitt	Rechteckquerschnitt
	Lichte Höhe (gemittelt)	beliebig	5,18 m
	Lichte Breite je Röhre	beliebig	26,00 m
	Querneigung	beliebig	2,5 %
	Außenwanddicke	beliebig	2,00 m
	Mittenwanddicke	beliebig	4,00 m
	Deckenstärke	beliebig	1,75 m
Erdüberdeckung	beliebig	6,10 m	
Lüftung	Volumenstrom Luft im Regelbetrieb	beliebig	303 m ³ /s
	Anzahl Brandprogramme	beliebig	1
	Aktivierung Brandlüftung	beliebig	60 s
	Volumenstrom Luft im Brandfall	beliebig	377 m ³ /s
Sicherheits- einrichtungen	Mittlerer Notausgangsabstand	beliebig	138,5 m,
	Kommunikationseinrichtungen	Keine	-
		Sirene	-
		ELA	-
		ELA + Video	ELA + Video
Sperrzeit des Tunnels	beliebig	60 s	
Baulicher Brandschutz	Temp.-Bereich & Dauer	beliebig	1.200 °C / 30 min

Tabelle 3: Eingangswerte zur Modellierung des Tunnels Leverkusen in QRAM.

VERKEHRSDATEN

Sowohl die Häufigkeit eines Ereignisses mit Gefahrgutfreisetzung als auch die hierbei zu erwartenden Schadensausmaße sind abhängig von der verkehrlichen Situation in einem Tunnel. In QRAM sind daher Angaben zum Verkehrsaufkommen differenziert nach PKW, LKW, Gefahrguttransporten und Bussen einschließlich der jeweiligen Personenbesetzungsraden für verkehrsstarke Zeiten am Tag und verkehrsarme Zeiten in der Nacht erforderlich. Das Gefahrgutaufkommen bestimmt sich hierbei durch Angabe des Gefahrgutanteils am Schwerverkehr. Liegen keine Erhebungen zum Gefahrgutaufkommen in einem Tunnel vor, ist gemäß dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln auf der sicheren Seite liegend ein Gefahrgutanteil von 6 % anzusetzen. Eine Verkehrsauswertung des Kraftfahrtbundesamts von

2014 (KBA 2014)⁸ weist einen mittleren Gefahrgutanteil von 3,8 % deutschlandweit aus. Demgegenüber wurde in der durgeführten Gefahrgutrisikoanalyse ein Gefahrgutanteil von 7,2 % verwendet. Diese Annahme überschreitet den nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln zu verwendenden Wert um den Faktor 1,2 und den von dem KBA ermittelten Wert um den Faktor 1,89 und beeinflusst dementsprechend das Ergebnis. Eine Zusammenstellung der maßgeblichen Verkehrsdaten enthält nachfolgende Tabelle 4.

Parameter Verkehr		Standardwerte	Gewählte Werte
DTV		beliebig	64.700 Kfz/Röhre
Schwerverkehrsanteil		beliebig	13,45 %
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr		6 %	7,2 %
Busanteil am SV-Verkehr		5 %	5 %
Zeitperiode	Tag (normal)	6.00-21.00 Uhr	6.00-21.00 Uhr
	Nacht (quiet)	21.00-6.00 Uhr	21.00-6.00 Uhr
Verkehrsstärke pro Stunde	Tag ⁹	1,3·DTV/24	1,3·DTV/24
	Nacht ⁹	0,5·DTV/24	0,5·DTV/24
Personenbesetzungsgrad	PKW	1,5	1,5
	LKW	1,1	1,1
	Bus	40	40
Geschwindigkeit	PKW	v _{zul}	80 km/h
	LKW	min(80,HBS ¹⁰ ,v _{zul})	80 km/h
Korrekturfaktor Unfallrate f. GG-Transporte		1	1

Tabelle 4: Durchschnittliche Verkehrsdaten für Deutschland bei der Anwendung des OECD/PIARC QRAM

UNFALLRATEN

Die Unfallraten hängen von zahlreichen streckenspezifischen Faktoren ab. Liegen keine Unfallstatistiken für einen zu untersuchenden Tunnel vor, sind nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln die Werte aus untenstehender Tabelle 5 zu verwenden. Im Rahmen der durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse wurde aufgrund der vorhandenen Zu- und Abfahrten innerhalb der Tunnelstrecke der entsprechende Wert für Richtungsverkehrstunnel angesetzt.

⁸ KBA 2014: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Verkehrsaufkommen 2014, VD1, Statistik

⁹ 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.

¹⁰ Bemessungsgeschwindigkeit für SV-Verkehr nach HBS in Anhängigkeit der Neigung und Länge einer Steigungsstrecke

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

Tabelle 5: Eingangsparemeter Unfallrate

GEFAHRGUTZUSAMMENSETZUNG

Um auf Basis der Unfallraten eine Differenzierung hinsichtlich der Freisetzung einzelner Gefahrgüter zu erhalten, werden Angaben zur Verteilung des Gefahrgutaufkommens erforderlich. Sofern keine streckenspezifischen Erhebungen vorliegen, sind in der Stufe 1b des Verfahrens zur Kategorisierung von Straßentunneln die in nachfolgender Tabelle 6 aufgeführten Werte zu verwenden.

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

Tabelle 6: Standard Gefahrgutverteilung für Deutschland bei der Anwendung von QRAM

BEVÖLKERUNG

In QRAM werden bei der Ermittlung der Risiken eines Tunnels die an die Portale angrenzenden Bereiche mit einbezogen. Daher sind Angaben zur Bevölkerungsdichte im Portalbereich erforderlich. Nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunnel ist hierbei die

Voreinstellung für ein städtisches Umfeld in QRAM zu wählen. Im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse der Stufe 1b wurde diese Einstellung verfahrensgemäß vorgenommen.

METEOROLOGIE

Zur Berücksichtigung der Windverhältnisse im Freifeld kann in QRAM entweder eine Windrose mit der Verteilung der Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten oder lediglich eine Verteilung der Windgeschwindigkeiten vorgegeben werden. Im Zuge der Gefahrgutrisikoanalyse nach Stufe 1b wurde auf die Berücksichtigung der Windverhältnisse verzichtet, da sich die Berechnungen auf den Portalbereich beschränkten. Der hierbei entstehende Fehler wird von den Autoren als vernachlässigbar erachtet.

2.3.1.3 Untersuchungsszenarien Stufe 1b

Standardmäßig lassen sich mit QRAM die in Tabelle 7 aufgeführten Szenarien abbilden. Die Festlegung weiterer Szenarien ist grundsätzlich durch die Eingabe der hierzu erforderlichen Parameter und Wirkungen möglich. Zur Berechnung der für Gefahrguttransporte wesentlichen Risikokenngrößen sind die Szenarien 3-13 des Modells maßgeblich, da die Szenarien 1 und 2 konventionelle LKW-Brände mit Brandleistungen von 20 MW bzw. 100 MW beschreiben. Verfahrensgemäß wurden im Rahmen der Überprüfung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten nach Stufe 1b daher lediglich die Szenarien 3-13 des Modells verwendet.

Szenario Nr.	Beschreibung	Ladung	Leckgröße [mm]	Freisetzungsrate Massenstrom [kg/s]
1	20 MW Lkw-Brand	-	-	
2	100 MW Lkw-Brand	-	-	
3	Heißgasexplosion (BLEVE) von Flüssiggasflaschen	50 kg		
4	Benzin Lachenbrand	28 t	100	20,6
5	Benzin Dampfwolkenexplosion (VCE)	28 t	100	20,6
6	Chloraustritt aus einem Tank	20 t	50	45
7	Heißgasexplosion (BLEVE) eines Flüssiggastanks	18 t	-	-
8	Dampfwolkenexplosion (VCE) aus Flüssiggastank	18 t	50	36
9	Freistrahbrand aus Flüssiggastank	18 t	50	36
10	Austritt von Ammoniak aus einem Tank	20 t	50	36
11	Austritt von Acrolein aus Tanks	25 t	100	24,8
12	Austritt von Acrolein aus Flaschen	100 l	4	0,02
13	Gasexplosion von tief- gekühltem verflüssigten CO ₂	20 t	-	

Tabelle 7: Übersicht der mit QRAM abbildbaren Szenarien

2.3.1.4 Schadensindikator Stufe 1b

Maßgebender Schadensindikator für die Risikoberechnung ist die Anzahl der getöteten Verkehrsteilnehmer sowie getöteter Personen im Portalbereich.

2.3.1.5 Bewertungskriterien Stufe 1b

Zur Bewertung werden bei der Anwendung von QRAM auf 1 km Tunnellänge normierte Schadenerwartungswerte (EV¹¹-Werte) verwendet. Um die typischen Gefahrgutrisiken bewerten zu können, reicht hierbei der Vergleich mit dem Gesamt-Schadenerwartungswert alleine nicht aus, da dieser i. d. R. durch die relativ häufigen Szenarien mit geringem Schadenausmaß dominiert wird. Seltenerere Ereignisse, die zu einem hohen Schadenausmaß führen, könnten so nicht berücksichtigt werden. Im Einzelnen werden daher die folgenden fünf Wirkungen bewertet:

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

Die mit Hilfe von QRAM ermittelten Schadenerwartungswerte (EV-Werte) der einzelnen Untersuchungsszenarien (vgl. Tabelle 7) werden hierzu hinsichtlich ihrer Wirkung aufaddiert, normiert und mit dem zulässigen Grenzwert verglichen. Ein zu bewertender Tunnel kann für alle Gefahrguttransporte freigegeben werden, wenn alle Grenzwerte nach Tabelle 8 unterschritten werden. Wird jedoch mindestens ein Grenzwert überschritten, ist ein Tunnel in einer vertieften Analyse gemäß Stufe 2 des Verfahrens zur Kategorisierung hinsichtlich der Freigabe bzw. etwaigen Beschränkung von Gefahrguttransporten zu untersuchen.

Wirkungen	Zuordnung der QRAM - Szenarien	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	3, 7, 8, 9	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Toxizität	6, 10, 11, 12	$4,0 \cdot 10^{-4}$
Druck	13	$1,0 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 8: Grenzwerte und Szenarien zur Bewertung des Risikos mit OECD/PIARC QRAM

2.3.1.6 Ergebnisse Stufe 1b

In der nachfolgenden Tabelle 9 sind getrennt nach den einzelnen Wirkungen die mit QRAM berechneten EV-Werte den nach dem Verfahren zur Kategorisierung zulässigen EV-Werten vergleichend gegenübergestellt. Daraus wird ersichtlich, dass sowohl der Grenzwert für die

¹¹ EV: Expected Value

Summe aller Wirkungen aus den Szenarien 3 bis 13 als auch die Grenzwerte für die Brandwirkung sowie für die kombinierte Druck- und Brandwirkung um bis das 2-fache überschritten wird. Auf Basis dieser Werte kommt die Gefahrgutrisikoanalyse der Stufe 1b zu dem Schluss, dass aufgrund dieser Überschreitungen die Kategorie A für den Tunnel Leverkusen nicht vergeben werden kann und der Tunnel verfahrensgemäß in der Stufe 2 vertieft zu analysieren ist.

Bei der Ergebnisinterpretation ist jedoch zu beachten, dass maßgebliche Einflussfaktoren auf der sicheren Seite liegend angenommen wurden. Dies betrifft zum einen die geometrische Abbildung des Tunnels mit einer durchgehenden Hauptröhre ohne Berücksichtigung der abschirmenden Wirkung der Trennwand im QRAM-Modell, woraus signifikant höhere Schadensausmaße resultieren. Außerdem haben Notausgangsabstände kleiner 300 m in QRAM keine sicherheitserhöhende Wirkung. Zum anderen wurde mit einem Gefahrgutanteil von 7,2 % ein Wert zugrundegelegt, der um den Faktor 1,2 über dem nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln anzusetzenden Gefahrgutanteil von 6 % liegt und den vom Kraftfahrtbundesamt ausgewiesenen mittleren Gefahrgutanteil von 3,8 % um den Faktor 1,89 überschreitet. Auch wenn man für den Standort Leverkusen ein um 20 % höheres Gefahrgutaufkommen unterstellt, würde sich bezogen auf den mittleren Wert des Kraftfahrtbundesamtes ein Gefahrgutanteil von 4,56 % für den Tunnel Leverkusen ergeben. Bezogen auf den angenommenen Wert von 7,2 % würde dies immer noch eine Überschreitung um den Faktor 1,58 bedeuten.

Wirkungen	Zuordnung der QRAM - Szenarien	Zulässiger EV-Vergleichswert (Schadenerwartungswert) [Tote/a·km]	Berechneter EV-Wert (Schadenerwartungswert) [Tote/ a·km]	Verhältnis berechneter - EV-Wert / zulässigem EV-Wert [-]
alle Wirkungen	3 bis 13	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-2}$	2,048
Brandwirkung	4, 5	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	2,040
Druck- /Brandwirkung	3, 7, 8, 9	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,26 \cdot 10^{-3}$	1,883
Toxizität	6, 10, 11, 12	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,99 \cdot 10^{-4}$	0,748
Druck	13	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,94 \cdot 10^{-9}$	0,008

Tabelle 9: Vergleichende Gegenüberstellung von zulässigem und berechnetem EV-Wert

2.3.2 Gefahrgutrisikoanalyse – Stufe 2a (T13.2)

Die Stufe 2a dient dazu, einen Straßentunnel gemäß den Kategorien A bis E nach ADR 2007 einzustufen. Die Zuordnung einer entsprechenden Tunnelkategorie erfolgt durch Bewertung der zu erwartenden Risiken mittels einer Vergleichsgrenze.

2.3.2.1 Modell Stufe 2a

Das Modell der Stufe 2a ist modular aufgebaut und ermöglicht eine transparente und jederzeit nachvollziehbare Risikoermittlung und -bewertung. Es gibt den Ablauf und die Rahmenbedingungen zur Kategorisierung von Tunneln vor und ist im Hinblick auf die einzusetzenden Modelle insbesondere vor dem Hintergrund des technischen Fortschritts bewusst offen gehalten. Nachfolgende Abbildung 4 gibt einen Überblick über den Modellaufbau bzw. den Ablauf nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln in der Stufe 2a.

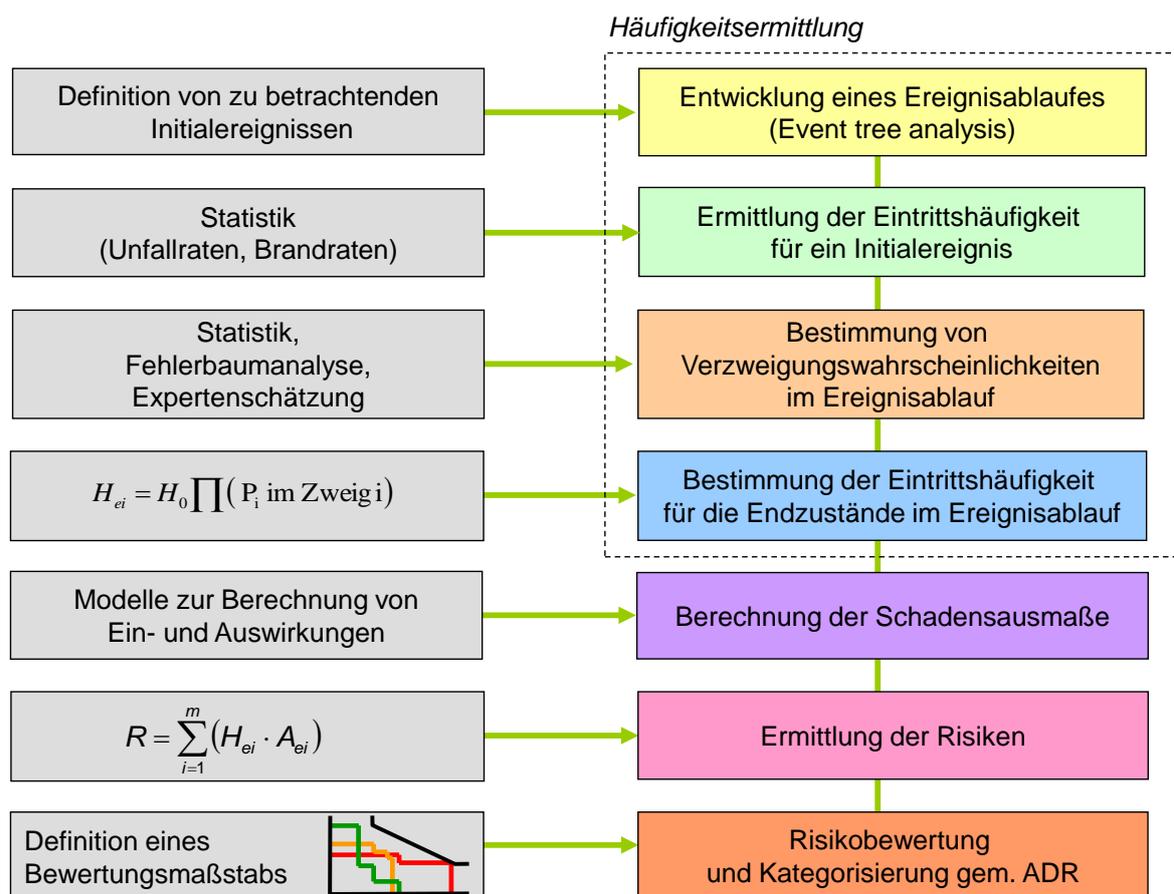


Abbildung 4: Modell zur Durchführung einer Gefahrgutrisikoanalyse nach Stufe 2a

DEFINITION VON AUSLÖSENDEN EREIGNISSEN

Das Spektrum der transportierten Gefahrgüter und der verschiedenen Wirkarten sowie der transportierten Mengen und Transportgebilde ist ausgesprochen breit und kann im Rahmen einer Risikoanalyse nicht vollständig abgedeckt werden. Aus diesem Grund werden mittels repräsentativer Stoffe - so genannter Leitstoffe - die maßgebenden Gefahrgutwirkungen abgebildet. Stellvertretend für die Gesamtheit aller hinsichtlich Personenschäden relevanter Gefahrgüter sind nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln für die Risikoanalyse und Risikobewertung folgende vier Leitstoffe zu verwenden:

- Benzin
- Propan
- Chlor
- Trinitrotoluol (TNT)

ENTWICKLUNG EINES EREIGNISABLAUFES

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. Auslösende Ereignisse bilden die leitstoffspezifischen Freisetzungshäufigkeiten für Benzin, Propan, Chlor, Trinitrotoluol (TNT). Abbildung 5 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines Ereignisbaums.

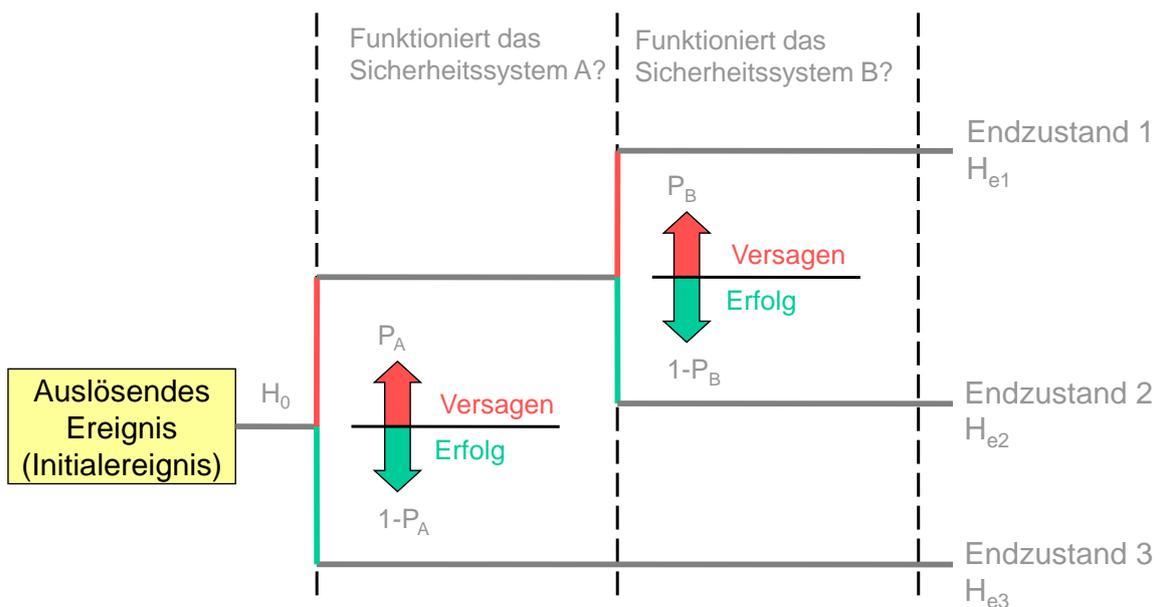


Abbildung 5: Beispiel für einen Ereignisbaum (Mayer, Baltzer 2003)

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

- ▶ Freisetzungsmenge
- ▶ Art der Freisetzung (spontan, kontinuierlich)
- ▶ Zündung (sofort, verzögert, keine)
- ▶ Ereignisort (Einfahrtsbereich, Tunnelinnenstrecke)
- ▶ Verkehrsaufkommen (Tag / Nacht)
- ▶ Verkehrszustand (freier Verkehr, Stau)
- ▶ Detektion erfolgreich (ja / nein)
- ▶ Alarmierung Tunnelnutzer gleichzeitig mit Detektion (ja / nein)
- ▶ Sperreinrichtung aktiviert (ja / nein)
- ▶ Lüftungssystem aktiviert (ja / nein)
- ▶ Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja /nein)
- ▶ Erhöhtes Ausmaß (ja / nein)
- ▶ Beginn der Fremdrettung.

ERMITTLUNG DER EINTRITTSHÄUFIGKEIT FÜR EIN INITIALEREIGNIS

Die Häufigkeit von Freisetzungen ist fallweise anhand von statistischen Daten zur Verkehrsleistung und zu Unfällen auf der betrachteten Strecke zu ermitteln. Zu berücksichtigende Einflussgrößen sind hierbei:

- ▶ Verkehrsaufkommen (DTV)
- ▶ Schwerverkehrsanteil (SV)
- ▶ Gefahrgutanteil
- ▶ Verhältnis Tunnelinnenstrecke / Portalbereich
- ▶ Gefahrgutbezogene Unfallrate
- ▶ Anteil des Leitstoffes an allen Gefahrgutfahrten

BESTIMMUNG VON VERZWEIGUNGSWAHRSCHEINLICHKEITEN IM EREIGNISABLAUF

Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum erfolgt mit Hilfe von statistischen Grundlagen, generischen Methoden (z. B. Fehlerbäumen) oder Annahmen. Die Summe der Verzweigungswahrscheinlichkeiten in einem Verzweigungspunkt ist stets gleich eins.

BESTIMMUNG DER EINTRITTSHÄUFIGKEITEN FÜR DIE ENDZUSTÄNDE

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

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

Mit:

$H_{e,i}$: Häufigkeit der Endzustände

H_0 : Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses

P_i : Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i

BERECHNUNG DER SCHADENSAUSMAßE

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 von Schadensausmaßen sowie zur Ermittlung von Maßnahmenwirksamkeiten sowohl einwirkungs- als auch auswirkungsseitig räumlich und zeitlich hochauflösende Rechenmodelle erforderlich.

Ermittlung von Einwirkungen (impacts)

Zur Ermittlung von Einwirkungen infolge von Bränden, Explosionen und Schadgasfreisetzungen sind nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln nur Modelle zulässig, die eine detaillierte Wiedergabe der geometrischen Verhältnisse im dreidimensionalen Raum einschließlich der betriebstechnischen Anlagen (Lüftung etc.) erlauben. Des Weiteren müssen die Modelle in der Lage sein, die Freisetzungs- und Ausbreitungsvorgänge raum- und zeitdiskret (instationär) abzubilden. Hierbei müssen beispielsweise Phasenübergänge (fest, flüssig, gasförmig), chemische Reaktionen, Brände, Prozesse der Wärmeübertragung sowie Turbulenzen abgebildet werden können. Abhängig vom jeweiligen Freisetzungsszenario sind hierzu Strömungsprogramme (CFD-Codes) oder auch Modelle zur Berechnung von Kurzzeitdynamiken (Hydrocodes) erforderlich. Ergebnis der Einwirkungsberechnungen sind Aussagen hinsichtlich Druck, Geschwindigkeiten, Wärme, Schadgaskonzentrationen und Sichtweiten.

Ermittlung von Auswirkungen (consequences)

Basierend auf den numerischen Berechnungen sind in Abhängigkeit der raum- und zeitabhängigen Einwirkgrößen (Druck, Temperatur, Konzentrationen) Auswirkungen auf die Tunnelnutzer zu ermitteln. Hierbei sind Modelle zu verwenden, durch welche die komplexen Wechselbeziehungen

zwischen den Einwirkgrößen, Fluchtgeschwindigkeit, Selbstrettungsmöglichkeiten über Notausgänge und Portale, Alarmierung und verkehrsabhängigem Personenaufkommen berücksichtigt werden. Ergebnis der Auswirkungsberechnungen sind Aussagen zu Selbstrettungsbereichen und den zu erwartenden Schadensausmaßen.

ERMITTLUNG VON RISIKEN

Auf Basis der ermittelten Häufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf und den korrespondierenden Schadensausmaßen berechnen sich die Risiken wie folgt:

$$R = \sum_{i=1}^m (H_{ei} \cdot A_{ei})$$

Mit:

m: Anzahl der Endzustände im Ereignisbaum

$H_{e,i}$: Häufigkeit der Endzustände

$A_{e,i}$: Schadensausmaß für jeweiligen Endzustand

Die Ergebnisse sind für jedes Untersuchungsszenario in Form von Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen (HA-Diagramm) darzustellen. Nachfolgende Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein HA-Diagramm für verschiedene Freisetzungsszenarien, das einen direkten Vergleich zwischen den einzelnen Untersuchungsszenarien (Leitstoffe) ermöglicht.

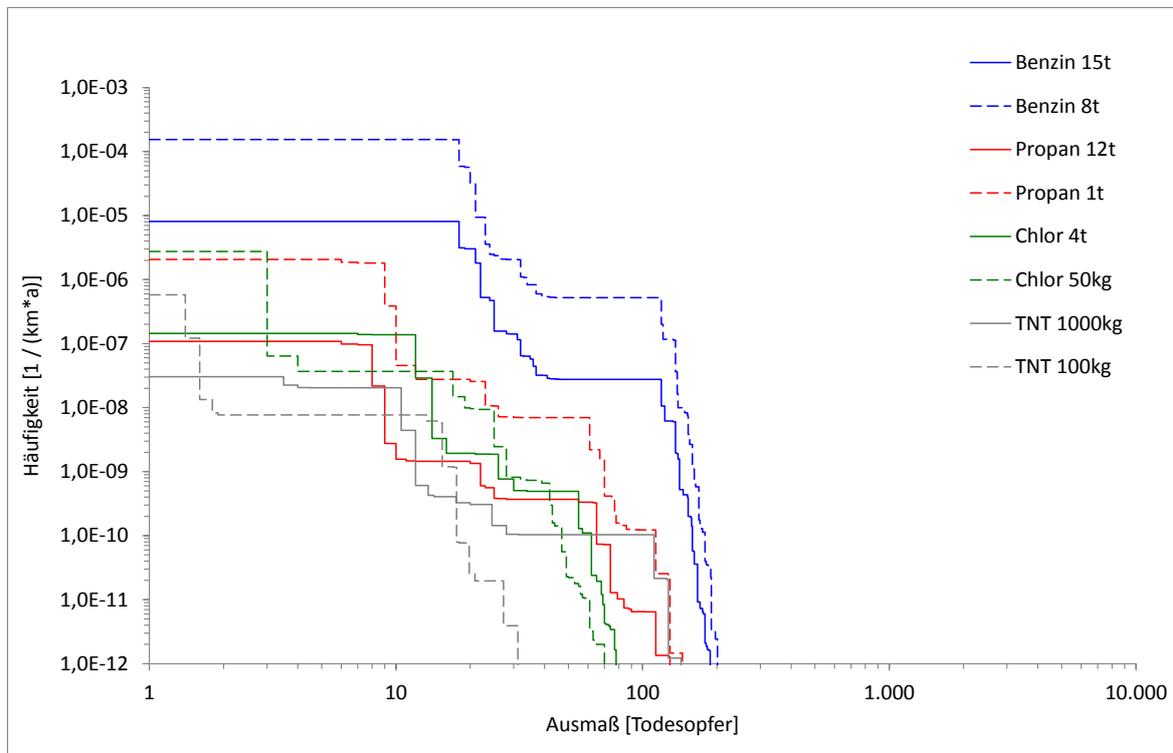


Abbildung 6: Beispiel eines HA-Diagramms

RISIKOBEWERTUNG UND KATEGORISIERUNG

Zur Bewertung der Risiken ist im Verfahren zur Kategorisierung von Tunneln als Bewertungsmaßstab eine Vergleichsgerade definiert (siehe Abbildung 7). Wird diese von der Gesamtsummenhäufigkeitslinie einer Kategorie überschritten, ist ein Tunnel für den Transport von Gefahrgütern dieser Kategorie zu beschränken.

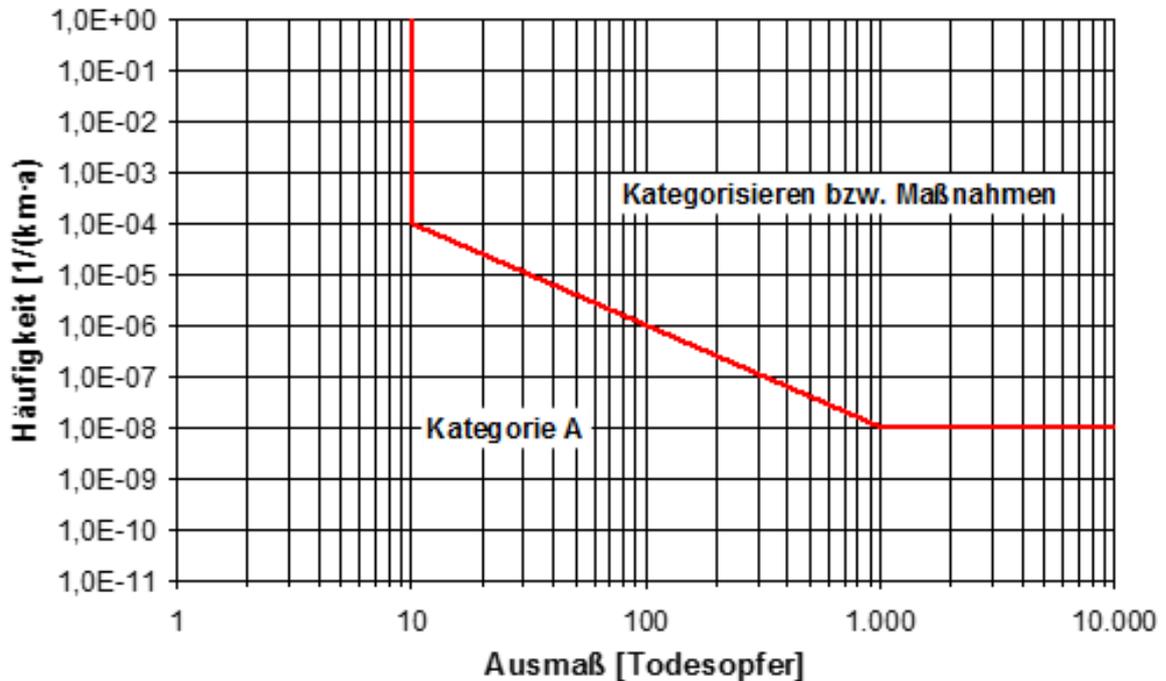


Abbildung 7: Vergleichskurve

Im Falle einer Beschränkung ist in der Verfahrensstufe 2b dann ggf. zu überprüfen, inwiefern die vorgesehene Umfahrungsstrecke die dann zu erwartenden Gefahrguttransporte hinsichtlich des Risikos aufnehmen kann. Alternativ kommt im Rahmen einer weiteren Untersuchung die Berücksichtigung von sicherheitserhöhenden Maßnahmen in Betracht, um das Risiko im Tunnel zu senken.

Nachfolgende Abbildung 8 zeigt beispielhaft eine Bewertung mittels des oben genannten Grenzkriteriums zur Überprüfung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten durch einen Tunnel während 24 Stunden und in den Nachstunden.

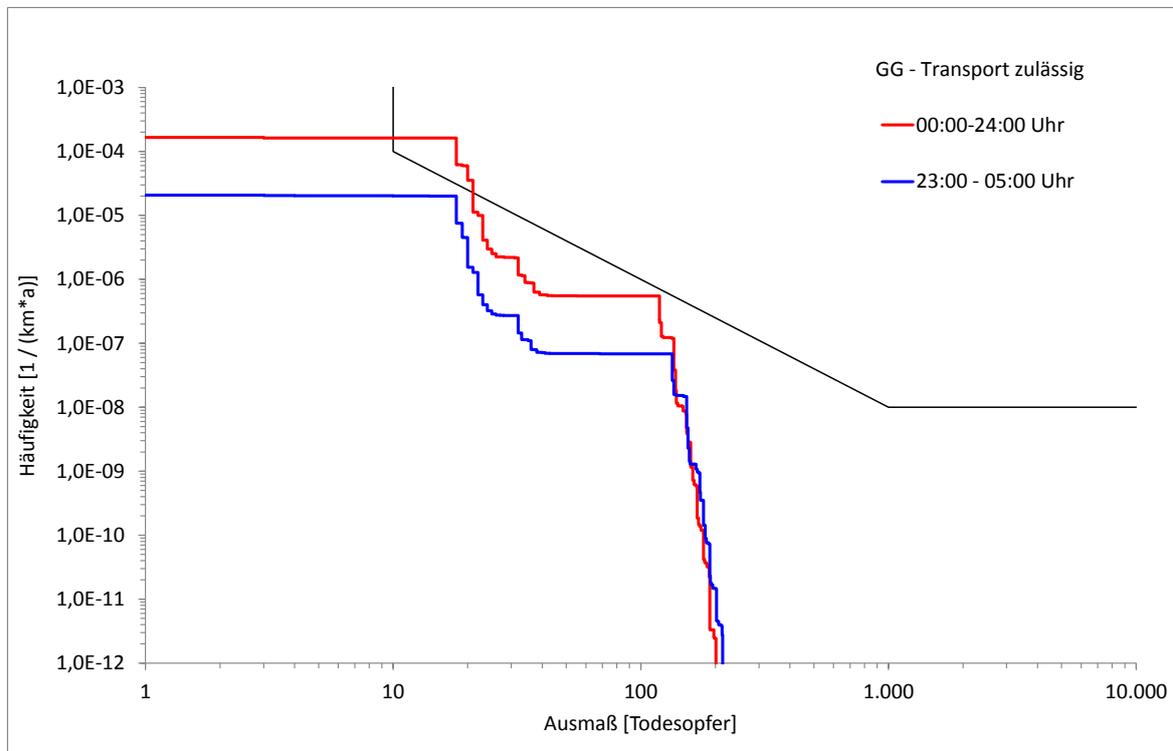


Abbildung 8: Beispiel einer Risikobewertung zur Kategorisierung nach ADR

2.3.2.2 Eingangsparemeter / Eingangsdaten Stufe 2a

TUNNELMODELLIERUNG

Zur Durchführung der numerischen Berechnungen ist ein Tunnel vollständig als 3-dimensionales Modell in einem hierfür geeigneten Berechnungsprogramm (CFD, Hydrocode) abzubilden. Neben der Abbildung der geometrischen Verhältnisse sind auch Fahrzeuge (Pkw, Lkw) für verschiedene Verkehrszustände sowie die wesentlichen Sicherheitseinrichtungen, wie eine mechanische Lüftung einschließlich deren Steuerung, Detektionseinrichtungen etc. im Rechenmodell zu modellieren. Zu berücksichtigen sind hierbei auch Effekte, wie sie sich aus der Fahrzeugbewegung (Kolbeneffekt) und Windeinfluss ergeben. Die Verwendung von QRAM ist aufgrund der im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gestellten Modellanforderungen in Stufe 2a nicht zulässig.

Im Rahmen der durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse wurden für die Szenarien mit den Leitstoffen Benzin und Chlor der CFD-Code Fire Dynamics Simulator (FDS) verwendet. Entgegen den Vorgaben im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln wurde in den Szenarien mit Propan und TNT das eindimensionale Modell von QRAM aus Stufe 1b eingesetzt. Da Modellgüte und Bewertungsmaßstab stets im direkten Zusammenhang stehen, kann sich bei Verwendung von zu stark vereinfachenden Modellen eine falsche Kategorisierung ergeben. Beispielsweise lassen sich in QRAM nicht die geometrischen Verhältnisse der Ein- und Ausfahrten sowie der Trennwand abbilden. Außerdem werden in die Bewertung die Portalbereiche mit einbezogen, was nicht

Gegenstand von Stufe 2a ist. In nachfolgender Tabelle 10 sind die nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln geforderten Modelle den in der durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse verwendeten Modellen gegenübergestellt.

Leitstoff	Nach Verfahren geforderte Modelle	In Stufe 2a verwendete Verfahre	Konformität mit Verfahren
Benzin	CFD	CFD Code FDS	Zulässig
Propan	CFD	QRAM	Nicht zulässig
Chlor	CFD	CFD Code FDS	Zulässig
TNT	CFD / Hydrocode	QRAM	Nicht zulässig

Tabelle 10: Vergleichende Gegenüberstellung der in Stufe 2a geforderten und verwendeten Modelle

VERKEHRSDATEN

Grundlage für die Ermittlung der Häufigkeit einer Gefahrgutfreisetzung sowie der zu erwartenden Schadensausmaße bilden Angaben zum Verkehrsaufkommen, der Verkehrszusammensetzung, der Fahrgeschwindigkeit sowie dem Fahrzeugbesetzungsgrad. Im Rahmen der in Stufe 2a zum Tunnel Leverkusen durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse wurden dieselben Eingangswerte wie in Stufe 1b verwendet. Dies bedeutet, dass insbesondere hinsichtlich des Gefahrgutaufkommens erhebliche Abweichung zu den Vorgaben im Verfahren bestehen. So wurde ein Gefahrgutanteil von den 7,2 % den Berechnungen zugrunde gelegt. Nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln ist auf der sicheren Seite liegend ein Gefahrgutanteil von 6 % anzusetzen, sofern keine Erhebungen zum Gefahrgutaufkommen in einem Tunnel vorliegen. In der Gefahrgutrisikoanalyse zum Tunnel Leverkusen wird der um den Faktor 1,2 höhere Wert mit dem Chemiestandort Leverkusen begründet. In einer Verkehrsauswertung des Kraftfahrtbundesamts von 2014 (KBA 2014)¹² wird für Deutschland ein mittlerer Gefahrgutanteil von 3,8 % ausgewiesen, der um den Faktor 1,89 unter dem in der Gefahrgutrisikoanalyse angenommenen Wert liegt. Unterstellt man für den Standort Leverkusen ein um 20 % höheres Gefahrgutaufkommen, würde sich der mittlere Gefahrgutanteil auf 4,56 % erhöhen. Dieser Wert wäre dann um den Faktor 1,58 geringer, als die in der Gefahrgutrisikoanalyse angenommenen 7,2 %. Abweichungen gegenüber den Vorgaben im Verfahren bestehen des Weiteren in der Unterteilung in Tag- und Nachtstunden sowie im jeweiligen Verkehrsaufkommen. In der Stufe 2a ist das Zeitintervall zwischen 6:00 und 22:00 Uhr, analog zu der Differenzierung bei Verkehrserhebungen, heranzuziehen. In nachfolgender Tabelle 11 sind die nach dem Verfahren geforderten Annahmen den in Stufe 2a gewählten Werten vergleichend gegenübergestellt. Abweichungen in Bezug auf die Vorgaben im Verfahren sind rot markiert.

¹² KBA 2014: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Verkehrsaufkommen 2014, VD1, Statistik

Parameter Verkehr		Nach Verfahren geforderte Werte	In Stufe 2a verwendete Werte
DTV		beliebig	64.700 Kfz/Röhre
Schwerverkehrsanteil		beliebig	13,45 %
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr		6 %	7,2 %
Busanteil am SV-Verkehr		5 %	5 %
Zeitperiode	Tag	6.00-22.00 Uhr	6.00-21.00 Uhr
	Nacht	22.00-6.00 Uhr	21.00-6.00 Uhr
Verkehrsstärke pro Stunde	Tag ¹³	z.B. 1,25·DTV/24	1,3·DTV/24
	Nacht ⁹	0,5·DTV/24	0,5·DTV/24
Personenbesetzungsgrad	PKW	1,5	1,5
	LKW	1,1	1,1
	Bus	40	40
Geschwindigkeit	PKW	v _{zul}	80 km/h
	LKW	min(80, v _{grenz})	80 km/h

Tabelle 11: Vergleichende Gegenüberstellung der in Stufe 2a geforderten und verwendeten Verkehrswerte

EINTRITTSHÄUFIGKEITEN

Nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln sind für Autobahnen zur Ableitung der Eintrittshäufigkeit von Gefahrgutfreisetzungen die in nachfolgender Tabelle 12 aufgeführten Freisetzungsraten anzusetzen.

Gefahrgut	Freisetzungsraten [$1/10^8$ Fz-km]		
	GG-Klasse 1	GG-Klasse 2	GG-Klasse 3
BAB	0,34	0,12	2,18

Tabelle 12: Freisetzungsraten der betrachteten Gefahrgutklassen für Bundesautobahnen

Die Gefahrgutklasse 1 umfasst hierbei ca. 1 % der gesamten Gefahrguttransporte und enthält hauptsächlich TNT-Transporte. Der Gefahrgutklasse 2 können ca. 15 % des gesamten Gefahrguttransportaufkommens zugeordnet werden. Wichtigste Vertreter der Klasse 2 sind Propantransporte mit einem Anteil von 20 % sowie Chlortransporte mit einem Anteil von 4 %. Die Gefahrgutklasse 3 bildet mit einem Anteil von 68 % am gesamten Gefahrguttransportaufkommen

¹³ 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.

die anteilig größte Gefahrgutklasse. Wichtigste Vertreter der Gefahrgutklasse 3 sind Benzin mit einem Anteil von 30 % und Diesel mit einem Anteil von 66 %.

Die Leitstoffe enthalten neben den namengebenden Stoffen weitere Vertreter aus derselben Gefahrgutklasse, sofern sie vergleichbare Stoffeigenschaften bzw. ähnliche Auswirkungen im Falle einer Freisetzung aufweisen und in relevanter Menge transportiert werden. Die zusätzlichen Stoffe sind zu berücksichtigen, indem die beschriebenen Anteile der transportierten Stoffe mit einem Faktor korrigiert werden.

In nachfolgender Tabelle 13 sind die daraus resultierenden Anteile der Leitstoffe an allen GG-Fahrten zusammengefasst.

Leitstoff	Gefahrgut- klasse	Anteil am Gefahrgut- verkehr	Wichtigste Vertreter	Anteil an Gefahrgut- klasse	Faktor zur Berücksich- tigung der anderen Vertreter	Leitstoffanteil an allen GG-Fahrten
Benzin	3	68 %	- Benzin - Heizöl (bzw. Diesel)	30 % 66 %	1,2	24,48 %
Propan	2	15 %	- Propan - Butan und weitere Vertreter	20 % 4 %	1,25	3,75 %
Chlor			- Chlor - Ammoniak u. a.	4 % 5 %	2,3	1,38 %
TNT	1	1 %	Diverse Explosivstoffe	100 %	1,0	1,00 %

Tabelle 13: Berücksichtigung weiterer Stoffe mit vergleichbaren Stoffeigenschaften bzw. möglichen Wirkungen an den Leitstoffen

Statistisch gesehen ist eine Tunnelstrecke weniger unfallgefährdet als die freie Strecke. So ist im Bereich der Tunnelinnenstrecke gegenüber der freien Strecke eine um 1/3 niedrigere Unfallrate zu erwarten. Im Vergleich zur Tunnelinnenstrecke weist jedoch die Einfahrtsstrecke eine um ca. 10 % höhere Unfallrate auf. Die Unfall- und Freisetzungsraten der freien Strecke sind daher entsprechend dieser Verteilung auf die verschiedenen Streckenbereiche (Portalbereich, Innenbereich) anzupassen.

Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen

- Verkehrsaufkommen (DTV)

- ▶ Schwerverkehrsanteil (SV)
- ▶ Gefahrgutanteil
- ▶ Verhältnis Tunnelinnenstrecke / Portalbereich
- ▶ Anteil des Leitstoffes an allen Gefahrgutfahrten

ergeben sich für den Tunnel Leverkusen je Röhre die in Tabelle 14 aufgeführten Eingangsgrößen für die jeweiligen Leitstoffe:

Leitstoff	Freisetzungshäufigkeiten/Jahr			
	Benzin	Propan	Chlor	TNT
Tunnel Leverkusen	$6,64 \times 10^{-4}$	$5,60 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-6}$	$4,23 \times 10^{-6}$

Tabelle 14: Leitstoffbezogene Freisetzungshäufigkeiten je Röhre für den Tunnel Leverkusen

Die den Berechnungen in der Gefahrgutrisikoanalyse zum Tunnel Leverkusen zugrunde liegenden Freisetzungshäufigkeiten sind nicht dokumentiert. Ein Vergleich mit dieser für das Verfahren grundlegenden Eingangsgröße ist daher nicht möglich.

VERZWEIGUNGSWAHRSCHEINLICHKEITEN

Art der Freisetzung

Hinsichtlich der Art der Freisetzung ist zu unterscheiden zwischen einer spontanen Freisetzung, bei der ein Großteil der Gefahrgutmenge durch das Platzen von Behältern innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls (Millisekunden bis wenige Sekunden) freigesetzt wird und einer kontinuierlichen Freisetzung, bei der aufgrund eines Lecks über einen längeren Zeitraum (Minuten bis Stunden) eine Freisetzung erfolgt. In nachfolgender Tabelle 15 sind die nach dem Verfahren zur Kategorisierung vorgegebenen Werte den im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse gewählten Werte vergleichend gegenübergestellt. Abweichungen gegenüber den Vorgaben im Verfahren bestehen in der Wahrscheinlichkeit der Art einer Chlorfreisetzung. Hier wurde angenommen, dass eine Chlorfreisetzung stets als eine spontane Freisetzung abläuft.

Leitstoff	Wahrscheinlichkeit der Freisetzungsart			
	spontan		kontinuierlich	
	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Benzin	10 %	10 %	90 %	90 %
Propan	5 %	5 %	95 %	95 %
Chlor	5 %	100 %	95 %	0 %
TNT	100 %	100 %	0 %	0 %

Tabelle 15: Wahrscheinlichkeit der Freisetzungsart

Art der Zündung

Bei Szenarien mit zündfähigen Leitstoffen (Benzin, Propan, Chlor) ist zu differenzieren zwischen Fällen mit sofortiger, verzögerter und keiner Zündung. Darüber hinaus ist bei den Leitstoffen Benzin und Propan zwischen Szenarien mit spontaner und kontinuierlicher Freisetzung zu unterscheiden. Nachfolgende Tabelle 16 und Tabelle 17 enthalten eine vergleichende Gegenüberstellung der nach dem Verfahren zur Kategorisierung vorgegebenen und den im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse gewählten Wahrscheinlichkeiten. Sämtliche Werte wurden im Zuge der Gefahrgutrisikoanalyse verfahrensgemäß angesetzt.

Leitstoff	Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei spontaner Freisetzung / Umsetzung					
	sofort		verzögert		keine	
	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Benzin	35 %	35 %	5 %	5 %	60 %	60 %
Propan	65 %	65 %	5 %	5 %	30 %	30 %
Chlor	-	-	-	-	-	-
TNT	10 %	10 %	60 %	60 %	30 %	30 %

Tabelle 16: Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei spontaner Freisetzung

Leitstoff	Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei kontinuierlicher Freisetzung					
	sofort		verzögert		keine	
	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Benzin	15 %	15 %	5 %	5 %	80 %	80 %
Propan	25 %	25 %	5 %	5 %	70 %	70 %
Chlor	-	-	-	-	-	-
TNT	-	-	-	-	-	-

Tabelle 17: Wahrscheinlichkeit einer Zündung bei kontinuierlicher Freisetzung

Ereignisort

Die Wahrscheinlichkeit des Unfallortes ist abhängig von der Verteilung der Unfälle über die Tunnellängsachse. Vereinfachend kann davon ausgegangen werden, dass sich die Verteilung möglicher Ereignisorte über ein Ereignis in der Mitte eines gleichbleibenden Abschnitts repräsentativ abbilden lässt. Im Zuge der Gefahrgutrisikoanalyse wurden pro Röhre die Abschnittsmitten der prägenden Querschnitte der Hauptröhren bzw. der Zu-/Abfahrt als Ereignisorte definiert und die Verzweigungswahrscheinlichkeiten entsprechend der Streckenlängen angenommen.

Zeitraum

In Abhängigkeit des Ereigniszeitpunktes befinden sich aufgrund des tageszeitlichen Verlaufs des Verkehrsaufkommens unterschiedlich viele Fahrzeuge und somit Personen im Tunnel. Prinzipiell zu unterscheiden sind hierbei Zeiten mit hohem Verkehrsaufkommen und Schwachlastzeiten. Gemäß dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln ist ein Zeitraum von 6:00 bis 22:00 Uhr für die Tagstunden und von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr für die Nachtstunden zu wählen. **In der Gefahrgutrisikoanalyse wurde abweichend hierzu ein Zeitraum von 6:00 bis 21:00 Uhr bzw. von 21:00 bis 6:00 Uhr gewählt. Dadurch verringert sich der Anteil der Tagstunden von 67 % auf 62,5 % und der Anteil der Nachtstunden erhöht sich dementsprechend von 37,5 %.** Da sich während der Nachtstunden im Ereignisfall aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens deutlich weniger potenziell betroffene Personen im Tunnel befinden, wirkt sich dies direkt risikoreduzierend aus.

Verkehrszustand

Aufgrund unterschiedlicher Verkehrszustände variiert die Anzahl der potenziell betroffenen Tunnelnutzer. Zu unterscheiden sind daher hierbei Verkehrszustände bei freiem Verkehrsfluss und bei Stau bzw. stockendem Verkehr. Gemäß dem Handbuch zur Bemessung von Verkehrsanlagen (HBS) ist daher von 50 Stunden Stau im Jahr (Qualitätsstufe D) infolge

Überlastung auszugehen. Die Annahmen zum Verkehrszustand wurden in der Gefahrgutrisikoanalyse verfahrensgemäß angenommen.

Ereignisdetektion

Die erfolgreiche Detektion eines Ereignisses mit Gefahrgutfreisetzung innerhalb der von RABT vorgesehenen Erkennungszeit von 60 sec ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Insbesondere ist hierbei die Wechselbeziehung zwischen Ereignisart und den vorhandenen Überwachungseinrichtungen zu beachten. Lassen sich beispielsweise Ereignisse mit Wärmefreisetzung über automatische Brandmeldesysteme erkennen, sind Schadgasfreisetzungen nur über durch Tunnelnutzer abgesetzte Meldungen (Notrufeinrichtungen, Mobiltelefon) und ggf. über Videosysteme erkennbar. In der Gefahrgutrisikoanalyse wurde für den Tunnel Leverkusen angenommen, dass sämtliche Ereignisse in 99,5 % der Fälle innerhalb einer Minute erkannt werden. **Dies erscheint als zu optimistisch und bedarf einer differenzierteren Betrachtung.**

Tunnelsperrung

Das zeitnahe Sperren eines Tunnels verhindert im Ereignisfall das Einfahren weiterer Fahrzeuge in den Gefahrenbereich und stellt somit ein bedeutendes Sicherheitselement dar. Eine erfolgreiche Tunnelsperrung hängt jedoch direkt von der Ereignisdetektion und der Verfügbarkeit der Sperreinrichtung ab. Im Zuge der Gefahrgutrisikoanalyse wird von einer erfolgreichen Tunnelsperrung in 99,5 % der Fälle ausgegangen. **Analog zur Ereignisdetektion erscheint dies als zu optimistisch und bedarf einer differenzierteren Betrachtung.**

Lüftungssystem

Im Fall einer Gefahrgutfreisetzung können Lüftungssysteme Absaugung oder Einstellen einer Längsströmung in eine Richtung dazu beitragen, die Gefährdung von Tunnelnutzern infolge äußerer Einwirkungen zu reduzieren. Auslegungsbedingt können Sie jedoch nur bei den kleineren Freisetzungsszenarien mit Brandfolge oder Schadgasfreisetzung ihre Wirkung entfalten. Der erfolgreiche Einsatz einer Lüftungsanlage ist zum einen von der Ereignisart und zum anderen von der erfolgreichen Detektion eines Ereignisses und der hinterlegten Steuerung abhängig. Für den Tunnel Leverkusen ist eine mechanische Längslüftungsanlage mit Strahlventilatoren vorgesehen, die im Ereignisfall szenarioabhängig zu betreiben ist. Angaben hinsichtlich der Verfügbarkeit der Lüftungsanlage in den einzelnen Szenarien werden in der Gefahrgutrisikoanalyse nicht gegeben.

Erhöhtes Ausmaß

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

Busanteil am Schwerverkehr von 5 % und einem Belegungsgrad von 40 Personen ausgegangen. D.h. in ca. 0,67 % der Fälle ist ein Ereignis mit erhöhtem Ausmaß zu erwarten. Auf der sicheren Seite liegend wird in der Gefahrgutrisikoanalyse von einem 1 % der Fälle mit erhöhtem Ausmaß ausgegangen.

Fremdrettung

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist ortspezifisch als Eintreffwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Eintreffzeit zu ermitteln. In der Gefahrgutrisikoanalyse zum Tunnel Leverkusen wird davon ausgegangen, dass in 5 % der Fälle 30 % der Personen rechtzeitig evakuiert werden können.

2.3.2.3 Untersuchungsszenarien Stufe 2a

Nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln sind pro Leitstoff jeweils zwei unterschiedliche Szenariengrößen bzw. -abläufe zu betrachten. Insgesamt ergeben sich somit 8 Grundszenarien. Jedem dieser Grundszenarien ist in Abhängigkeit der im ADR definierten Hauptgefahren ein Tunnelbeschränkungscode zugeordnet. Im Fall von Benzin-, Propan- und Chlorfreisetzungen wird jeweils noch zwischen einer spontanen und kontinuierlichen Freisetzung unterschieden. Daraus resultieren 14 unterschiedliche Freisetzungsszenarien.

Sämtliche Freisetzungsszenarien sind nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln mit hierfür geeigneten Simulationsprogrammen abzubilden. Eine hiervon abweichende Betrachtung kann zu einer falschen Kategorisierung der Tunnel führen.

Nachfolgende Tabelle 18 enthält eine Zusammenstellung der nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln zu betrachtenden Szenarien.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Analyse der vorliegenden Grundlagen

Leitstoff	Szen.-Nr.	Freisetzungsort	Freigesetzte Menge	Berücksichtigte Ausbreitungs- und Wirkungsarten	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR	Tunnelkategorie nach ADR
Benzin	1	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 20 m³ mit einer Rate von 300 kg/s bzw. 20,6 kg/s .	15 t	<ul style="list-style-type: none"> - Sofortige Zündung und Lachenbrand - Lachenbildung und verzögerte Zündung - Rauchgasausbreitung 	große Brandgefahr	D
	2	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 10 m³ mit einer Rate von 300 kg/s bzw. 20,6 kg/s .	8 t	<ul style="list-style-type: none"> - Sofortige Zündung und Lachenbrand - Lachenbildung und verzögerte Zündung - Rauchgasausbreitung 	-	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"> - Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE - Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand 	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"> - Sofortige Zündung und Feuerball/BLEVE - Verzögerte Zündung und Gaswolkenbrand und / oder Freistrahbrand 	große Brandgefahr	D
Chlor	5	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von 4 t mit einer Rate von 45 kg/s bzw. 400 kg/s	4 t	Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen	Freisetzung giftiger Stoffe	C
	6	Transport in Kleingebinden, spontane oder kontinuierliche Freisetzung von 50 kg mit einer Rate von 45 kg/s bzw. 400 kg/s	50 kg*	Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen	-	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	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)	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	Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte)	große Explosionsgefahr	C

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

Tabelle 18: Untersuchungsszenarien zur Abbildung der Kategorien gemäß ADR

2.3.2.4 Ausbreitungs- und Strömungsberechnungen

Zur Durchführung der Ausbreitungs- und Strömungsberechnungen wurde für die Leistoffe Benzin und Propan der CFD-Code Fire Dynamics Simulator (FDS) verwendet. Die Berechnung der Propan und TNT Frei- bzw. Umsetzungen erfolgte mit dem Model QRAM aus der Stufe 1b, das nicht die an die Modelle in Stufe 2a gestellten Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Modellgüte erfüllt.

MODELLIERUNG UND BERECHNUNGEN BENZINFREISETZUNG

Nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln sind mittels eines geeigneten CFD-Codes kontinuierliche und spontane Benzinfreisetzungen durch Modellierung der entsprechenden Massenströme für jeweils eine 8 t und 15 t Ladung abzubilden. Insgesamt ergeben sich somit 4 Freisetzungsszenarien für den Leitstoff Benzin.

Im Rahmen der durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse wurden abweichend zu den Vorgaben im Verfahren lediglich 2 Szenarien mit Benzinfreisetzung berechnet. In dem einen Szenario wurde eine Freisetzungsmenge von 8 t mit einer kontinuierlichen Freisetzungsrate von 20 kg/s und in dem anderen Szenario eine Freisetzungsmenge von 15 t bei einer Freisetzungsrate von 30 kg/s betrachtet. Die Berechnungen zu den Benzinfreisetzungen erfolgten mittels des Simulationsprogramms FDS. Hierbei wurde eine vereinfachte Methode gewählt ohne die Massenströme explizit abzubilden. Die sich infolge der Freisetzung ausbildende Benzinlache wurde empirisch abgeschätzt und durch eine feste Brandfläche abgebildet. Effekte durch die dynamische Ausbreitung einer Lache sowie der Übergang von der Flüssigphase in die Gasphase bleiben hierbei unberücksichtigt. Die Brandleistung wurde für die kontinuierliche Freisetzung auf 200 MW und für die spontane Freisetzung auf 800 MW festgesetzt.

Eine vergleichende Gegenüberstellung der nach dem Verfahren abzubildenden Szenarien mit den im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse berücksichtigten bzw. gewählten Szenarien enthält nachfolgende Tabelle 19.

Leitstoff	Freisetzungsart			
	kontinuierlich		spontan	
Benzin	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Freisetzungsmenge	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
8 t	20 kg/s	20 kg/s	300 kg/s	Nicht simuliert
15 t	20 kg/s	Nicht simuliert	300 kg/s	300 kg/s

Tabelle 19: Vorgegebene und berücksichtigte Benzinfreisetzungsszenarien in Stufe 2a

MODELLIERUNG UND BERECHNUNGEN PROPANFREISETZUNG

Propanfreisetzungen sind nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln mit Hilfe eines hierzu geeigneten CFD-Codes abzubilden. Hinsichtlich der Szenarien ist wiederum zwischen einer kontinuierlichen und spontanen Freisetzung zu unterscheiden die über entsprechende Massenströme im Simulationsprogramm abzubilden sind. Für beide Freisetzungsarten ist eine Freisetzungsmenge (Ladung) von 1 t und 12 t zu berücksichtigen. Daraus resultieren insgesamt 4 Freisetzungsszenarien für den Leitstoff Propan.

Entgegen der Vorgaben im Verfahren wurden die Propanfreisetzungen mit Hilfe von QRAM abgebildet. Dadurch wird zum einen signifikant von den im Verfahren vorgegeben Freisetzungsszenarien abgewichen und zum anderen werden durch QRAM nicht die Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Modellgüte erfüllt.

Eine Zusammenstellung der nach dem Verfahren geforderten Szenarien und der durchgeführten Berechnungen enthält nachfolgende Tabelle 20.

Leitstoff	Freisetzungsart			
	kontinuierlich		spontan	
Propan	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Freisetzungsmenge	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
1 t	30 kg/s	QRAM	400 kg/s	QRAM
12 t	30 kg/s	QRAM	400 kg/s	QRAM

Tabelle 20: Vorgegebene und berücksichtigte Propanfreisetzungsszenarien in Stufe 2a

MODELLIERUNG UND BERECHNUNGEN CHLORFREISETZUNG

Gemäß dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln sind Chlorfreisetzungen durch Verwendung eines hierzu geeigneten CFD-Codes abzubilden. Zu betrachten sind Szenarien mit kontinuierlicher und spontaner Freisetzung. Beiden Freisetzungsarten ist eine Freisetzungsmenge (Ladung) von 50 kg und 4 t zugrunde zu legen und deren Freisetzungsraten von 45 kg/s und 400 kg/s über Massenströme im CFD-Modell abzubilden. Betrachtet werden müssen im Fall von Chlor ebenfalls 4 Szenarien.

In der Gefahrgutrisikoanalyse erfolgte die Abbildung der Chlorszenarien mittels des CFD-Codes FDS. Betrachtet wurden lediglich ein Szenario mit einer kontinuierlichen Freisetzung von 45 kg/s bei einer Ladungsmenge von 50 kg sowie ein weiteres Szenario mit einer spontanen Freisetzung von 400 kg/s und einer Ladungsmenge von 4 t. Weitere Angaben zur Modellierung werden nicht gegeben.

In nachfolgender Tabelle 21 sind die nach dem geforderten Szenarien und den in der Gefahrgutrisikoanalyse durchgeführten Berechnungen vergleichend gegenübergestellt.

Leitstoff	Freisetzungsart			
	kontinuierlich		spontan	
Chlor	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Freisetzungsmenge				
0,05 t (50 kg)	45 kg/s	45 kg/s	400 kg/s	Nicht simuliert
4 t	45 kg/s	Nicht simuliert	400 kg/s	400 kg/s

Tabelle 21: Vorgegebene und berücksichtigte Chlorfreisetzungsszenarien in Stufe 2a

MODELLIERUNG UND BERECHNUNGEN TNT-UMSETZUNG

Zur Abbildung der kurzzeitdynamischen Prozesse während eines Detonationsvorgangs werden räumlich und zeitlich hochauflösende CFD-Codes oder Hydrocodes erforderlich. Nach dem Verfahren sind lediglich ein Szenario mit einer 100 kg Ladung und ein Szenario mit einer 1t-Ladung zu betrachten.

In der Gefahrgutrisikoanalyse wurden Explosionsszenarien mit Hilfe von QRAM berechnet. Da in QRAM keine mit dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln vergleichbaren Szenarien abgebildet werden können, sind die durchgeführten Berechnungen mehr als fraglich.

Eine Übersicht über die nach dem Verfahren vorgegebenen Explosionsszenarien und den im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalyse berücksichtigten TNT-Berechnungen enthält nachfolgende Tabelle 22.

Leitstoff	Freisetzungsart			
	kontinuierlich		spontan	
TNT	vorgegeben	gewählt	vorgegeben	gewählt
Freisetzungsmenge				
0,1 t	-	-	0,1 t	QRAM
1,0 t	-	-	1,0 t	QRAM

Tabelle 22: Vorgegebene und berücksichtigte TNT-Umsetzungsszenarien in Stufe 2a

2.3.2.5 Wirk- und Entfluchtungsberechnungen

Die Ermittlung von Schadensausmaßen erfolgt mittels der Software ODEM¹⁴, welche durch die Verknüpfung äußerer Einwirkungen mit den Fluchtbewegungen der Tunnelnutzer in Abhängigkeit von Grenzkonzentrationen und -temperaturen die Anzahl an Opfern ausgibt. Berücksichtigung

¹⁴ ODEM: One-Dimensional Egress Model for Risk Assessment

finden hierbei Reaktionszeiten, Fluchtgeschwindigkeiten, Notausgangsabstände sowie Fahrzeugbelegungen. Tunnelnutzer beginnen 60 sec nach Alarmierung mit der Selbstrettung und flüchten mit einer Gehgeschwindigkeit von 0,5 m/s – 1,5 m/s zum nächstgelegenen Notausgang oder Portal. Hierbei wird angenommen, dass Tunnelnutzer nicht durch die Ereigniszone oder verrauchte Zonen flüchten. Wird ein Notausgang oder ein Tunnelportal erreicht, gilt eine Person als gerettet. Bei Überschreitung einer Grenztemperatur bzw. einer Grenzkonzentration für CO oder Chlor, werden Personen als Todesopfer registriert.

2.3.2.6 Ergebnisse Stufe 2a

Die Gefahrgutrisikoanalyse wurde in der Stufe 2a des Verfahrens zur Kategorisierung von Straßentunneln für eine Zulässigkeit von Gefahrguttransporten im Tunnel Leverkusen über 24 h (Tagfall) und während den verkehrsarmen Zeiten in der Nacht zwischen 21:00 Uhr und 6:00 Uhr (Nachtfall) durchgeführt. Auf Basis der durchgeführten Berechnungen kann der Tunnel Leverkusen sowohl über den gesamten Tag als auch in den Nachtstunden nicht für den uneingeschränkten Transport von gefährlichen Gütern freigegeben werden. Ausschlaggebend hierfür sind die betrachteten Szenarien mit Propanfreisetzungen, die sowohl im Tag- als auch im Nachtfall zu einer Überschreitung der Grenzkurve führen. Durch die Leitstoffe Benzin und TNT wird die Grenzkurve am Tag nur minimal nicht überschritten. Dagegen wird in den Nachtstunden das Grenzkriterium durch Benzin und TNT das Grenzkriterium deutlich nicht erreicht. Der Transport von Chlor führt sowohl am Tag als auch in der Nacht zu einer deutlichen Unterschreitung des Grenzkriteriums. Aufgrund der Überschreitungen der Grenzkurve durch den Leitstoff Propan wird empfohlen, den Tunnel entsprechend zu kategorisieren. Während am Tag die Summenkurven des Leitstoffs Propan für die freigesetzten Mengen von 12 t und 1 t über der Grenzkurve liegen, wird diese in der Nacht nur durch die freigesetzte Menge von 12 t Propan überschritten. Für den Tag wird die freigesetzte Menge von 1 t Propan durch die restriktivere Kategorie D nach ADR maßgebend. Im Nachtfall ist die freigesetzte Menge von 12 t mit der Kategorie B nach ADR für den gesamten Tunnel maßgebend. Es wird daher empfohlen, den Tunnel am Tag in der Zeit von 6:00 bis 21:00 Uhr der Kategorie D und in der Nacht in der Zeit von 21:0 Uhr bis 6.00 Uhr der Kategorie B zuzuordnen.

Aufgrund der getroffenen Annahmen sowie den Abweichungen zu den Vorgaben im Verfahren zur Kategorisierung, erscheint die vorgenommene Kategorisierung als nicht zuverlässig. Dies betrifft insbesondere der den Berechnungen zugrundeliegenden Gefahrgutanteil sowie die verwendeten Rechenmodelle zur Bestimmung von Einwirkungen und die hierzu erforderlichen Modellierungen von Gefahrgutfreisetzungen. Des Weiteren sind die getroffenen Annahmen und Berechnungen wenig transparent dargestellt und nicht in jedem Punkt nachvollziehbar.

Sofern keine detaillierten Erhebungen zum Gefahrgutaufkommen in einem Tunnel vorliegen, ist nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln auf der sicheren Seite liegend ein Gefahrgutanteil von 6 % anzunehmen. Im Rahmen der Gefahrgutrisikoanalysen wurde zur Berücksichtigung des Chemiestandorts Leverkusen ein Gefahrgutanteil von 7,2 % angenommen. Vor dem Hintergrund, dass das mittlere Gefahrgutaufkommen in Deutschland nach Erhebungen

des Kraftfahrtbundesamts 3,8 % beträgt, entspricht dies einem um den Faktor 1,89 höheren Gefahrgutanteil. Selbst wenn man für den Standort Leverkusen ein um 20 % höheres Gefahrgutaufkommen unterstellt und sich somit der mittlere Gefahrgutanteil auf 4,56 % erhöht, wäre dieser Wert dann immer noch um den Faktor 1,58 niedriger als der Gefahrgutanteil von 7,2 %. Da sich der Gefahrgutanteil direkt auf die Risiken auswirkt, beeinflusst dies auch das Ergebnis der Kategorisierung.

Da die Verfahren und Methoden zur Schadensausmaßermittlung in direktem Zusammenhang mit dem Bewertungsmaßstab stehen, dürfen zur verlässlichen Kategorisierung nur Rechenprogramme und Modellierungen verwendet werden, die den Anforderungen und Vorgaben nach dem Verfahren zur Kategorisierung entsprechen. In der zum Tunnel Leverkusen durchgeführten Gefahrgutrisikoanalyse betrifft dies insbesondere die Abbildung der Szenarien mit Propanfreisetzungen und TNT-Umsetzungen. Hier wurde das stark vereinfachende Modell aus Stufe 1b angewendet, was gemäß dem Verfahren nicht zulässig ist und aufgrund fehlender Abbildungsgenauigkeit zu erhöhten Schadensausmaßen führt. Da gerade diese Szenarien maßgeblich zur Kategorisierung des Tunnels Leverkusen beitragen, sind die getroffenen Aussagen nicht belastbar und nochmals zu überprüfen. Bei der Bestimmung der Schadensausmaße sind außerdem zwingend sämtliche im Verfahren definierte Szenarien mit Gefahrgutfreisetzungen abzubilden, da hiervon abweichende Betrachtungen ggf. zu einer falschen Kategorisierung des Tunnels führen.

3 Verbesserungsmaßnahmen

Um den Transport von Gefahrgütern im Tunnel Leverkusen zu ermöglichen, kommen zusätzliche konstruktive, technische und betrieblich-organisatorische Maßnahmen sowie deren Kombination in Betracht. Im Folgenden werden einzelne Maßnahmen vorgestellt, die eine Reduzierung der Gefahrgutrisiken im Tunnel Leverkusen bewirken. Die in Folge der ergänzenden Gefahrgutuntersuchungen verwendeten Lösungsmöglichkeiten werden gegenüber der vorliegenden Machbarkeitsstudie hinsichtlich der Kostenveränderungen näher betrachtet.

3.1 Konstruktive Lösungsmöglichkeiten

3.1.1 Verkürzung des Notausgangsabstands (Vergleichsuntersuchung Variante 2)

Eine signifikante Verbesserung in den Selbstrettungsmöglichkeiten ist durch eine Verkürzung der Abstände zwischen den Notausgängen erzielbar. Durch kürzere Fluchtwegdistanzen können sich Tunnelnutzer im Ereignisfall auch bei schnell ablaufenden Ausbreitungsvorgängen eher in sichere Bereiche retten. In vergleichbaren Tunnelanlagen haben sich Notausgangsabstände von ca. 60 m als günstig erwiesen. Dadurch werden Fluchtweglängen von ca. 30 m erzielt, wie sie auch im Hochbau gefordert sind. In Tunneln, die in offener Bauweise hergestellt werden, lassen sich zusätzliche Notausgänge ohne großen Mehraufwand in die Nachbarröhre realisieren.

3.1.2 Verlängerung der Trennwand zwischen Hauptröhre und Zu-/Abfahrten über gesamte Tunnellänge (Vergleichsuntersuchung Variante 4)

Die derzeitigen Planungen sehen bis zu den Abzweigungen zu den Zu- und Abfahrten einen 6-streifigen Querschnitt vor. Dadurch treten Verflechtungsverkehre innerhalb der Tunnelstrecke auf, die zu einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit und somit der Häufigkeit von Gefahrgutfreisetzungen führen. Außerdem sind die Hauptröhren nicht von den Zu- und Abfahrten entkoppelt, so dass im Ereignisfall die jeweiligen Röhren einer Fahrtrichtung nicht als sicherer Bereich gelten und daher hohe Betroffenenzahlen zu erwarten sind. Eine Verlängerung der Trennwände bis zum Westportal des Tunnels Leverkusen würde die Problematik der Verflechtungsvorgänge auf die freie Strecke verlagern und zudem die Anzahl der im Ereignisfall potentiell betroffenen Personen deutlich verringern. Dadurch würden getrennte Röhren mit 2 und 4 Fahrstreifen entstehen, die, kombiniert mit kurzen Notausgangsabständen, zu einer deutlichen Reduzierung der Gefahrgutrisiken im Tunnel Leverkusen führen.

3.1.3 Rasterdecken

Durch in regelmäßigen Abständen in der Tunneldecke angeordnete Öffnungen werden die Röhren in kleinere überdeckelte Abschnitte untergliedert. Im Ereignisfall mit einer thermischen Freisetzung (Benzin, Propan) sowie infolge von Detonationen können die hierbei entstehenden

Einwirkungen wie Druck, Wärme, Schadgase und Rauch über die Öffnungen entweichen. Lediglich im Fall von Schwergasfreisetzungen, wie z.B. Chlor, zeigen die Deckenöffnungen dann nur eine begrenzte Wirkung.

Die Rasterdecke wird zur Erhöhung der Sicherheit bzgl. Gefahrguttransporte in der Machbarkeitsstudie qualitativ in Betracht gezogen¹⁵. Dabei wird konstruktiv ein Tunnel mit offenen Deckenfeldern von 100 m unterstellt, der allein aus tragwerksplanerischer Sicht nicht funktionieren würde (z.B. Auftriebsproblematik, bis zu 8 m auskragende Wände gegen vollen Erd- und Wasserdruck, etc.). Allerdings wird diese Variante aus anderen Gründen verworfen. Sie führe durch Blendung zu einer erheblichen Einschränkung der Tunnelnutzer; und weil die Lüftungssituation als schwierig angesehen wird, erfolgt keine zusätzliche, nähere Betrachtung.

Durch eine etwas kreativere Auseinandersetzung mit der Konstruktion könnten die aufgezeigten Defizite möglicherweise kompensiert werden und auf dieser Basis eine interessante Alternative entwickelt werden. Die Ausführung von langgezogenen Entrauchungsschächten ähnlich wie in U-Bahnhöfen ermöglicht einerseits ein freies Entweichen von Rauchgasen sowie den Abbau von Detonationsdrücken. Andererseits verhindert der verschwenkte Verlauf den Einfall von Tageslicht und Witterungseinflüssen wie Regen oder Schnee in den Tunnel. Die erforderlichen Schachtwände wirken wie Überzüge auf der Tunneldecke und erhöhen somit die Tragfähigkeit. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Lüftungstechnische Wirksamkeit könnte z.B. anhand des im Rahmen eines Forschungsprojektes der BAST entwickelten Modelltunnels¹⁶ untersucht werden.

¹⁵ vgl. „Machbarkeitsstudie – Zulässigkeit Gefahrguttransporte Leverkusen“, Kap. 6.5, Seite 32

¹⁶ Nähere Hinweise und Informationen finden sich hier (abgerufen am 11.02.2017): „Informationen aus der BAST“, Ausgabe 3/2016, Seite 1 (http://www.bast.de/DE/Publikationen/BAST-aktuell/Downloads/BAST-aktuell-2016-03.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
<http://www.isac.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/forschung/laufende-forschungsvorhaben/~uia/untersuchungen-zur-optimierung-von-laengs/?lang=de>

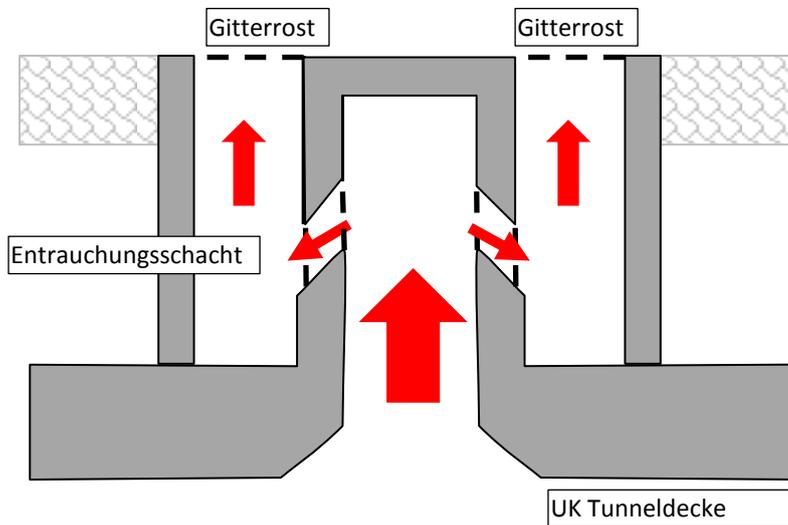


Abbildung 9: Prinzipskizze Entrauchungsschacht U-Bahnhof

Eine vergleichbare Differenzkostenbetrachtung ist an dieser Stelle nicht ohne größeren Aufwand möglich. Neben den Mehrkosten für die Entrauchungskonstruktion lassen sich aber möglicherweise Einsparungspotentiale im Bereich der Tunnellüftung und durch größere Notausgangsabstände erreichen.

3.2 Betriebstechnische Lösungsmöglichkeiten

3.2.1 Verbesserte Detektion

Das schnelle Erkennen eines Ereignisses mit sofortiger Alarmierung der Tunnelnutzer kann entscheidend dazu beitragen, dass sich Personen im Ereignisfall in sichere Bereiche retten können. Insbesondere in Kombination mit verkürzten Notausgangsabständen ergeben sich hierdurch signifikante Risikoreduktionen. Des Weiteren ermöglicht eine schnelle Detektion die unmittelbare Sperrung eines Tunnels im Ereignisfall, wodurch die Zufahrt weiterer Fahrzeuge in den Gefährdungsbereich unterbunden und somit die Anzahl potenziell betroffener Personen reduziert wird. Eine schnelle Gefahrenerkennung ermöglicht beispielsweise eine Videoüberwachung mit automatischer Bildauswertung (Videodetektion). Mit derartigen Systemen lassen sich Ereignisse frühzeitig erkennen, ggf. bereits vor einer Gefahrgutfreisetzung, wenn dieser beispielsweise ein Unfall vorausgeht.

3.2.2 Löschanlagen

Mit Hilfe von Löschanlagen lassen sich Brände in der Entstehungsphase eindämmen. Aufgrund der sich sehr schnell entwickelnden Brände bei Beteiligung von Gefahrgütern setzt dies jedoch eine schnelle und ortsgenaue Detektion eines Ereignisses voraus. In Straßentunneln kommen hierzu entweder Hochdrucknebelanlagen oder Schaumlöschanlagen zum Einsatz. In Deutschland sind bisher zwei stationäre Löschanlagen in Bundesfernstraßentunneln (Tunnel Jagdberg, Tunnel Pörzberg) installiert worden. Hierbei handelt es sich in beiden Fällen um Schaumlöschanlagen.

3.2.3 Leistungsfähige Absaugeinrichtungen (Lüftung)

Um Tunnelnutzer vor den Einwirkungen von Rauch und Wärme schützen zu können, sind auch leistungsfähige Absaugeinrichtungen denkbar, die auf große Energiefreisetzungen (z.B. 300 MW) dimensioniert werden und direkt über die Tunneldecke ins Freie entlüften. Ein System mit direkter Absaugung über die Tunneldecke in Freie ist beispielsweise im Tunnel Bad Ems installiert.

3.3 Betrieblich, organisatorische Lösungsmöglichkeiten

3.3.1 Zulässigkeit von Gefahrguttransporten nur in verkehrsarmen Zeiten (Nachts)

Die Zulässigkeit von Gefahrguttransporten ausschließlich während verkehrsarmer Zeiten wirkt sich reduzierend auf die Gefahrgutrisiken aus, da die Anzahl der potentiell betroffenen Personen in diesen Zeiten geringer ist. Die positive Wirkung dieser Maßnahme wurde bereits in der Gefahrgutrisikoanalyse zum Tunnel Leverkusen nachgewiesen. Praktiziert wird dies beispielsweise seit Jahren im Elbtunnel Hamburg.

3.3.2 Portalfeuerwehr (Verbesserung der Fremdrettung)

Durch das Vorhalten einer Portalfeuerwehr verkürzen sich die Zugriffszeiten im Ereignisfall erheblich, und es kann frühzeitig mit der Ereignisbewältigung begonnen werden. Praktiziert wird dies am Elbtunnel Hamburg seit seiner Inbetriebnahme im Jahr 1974. Trotz häufiger Einsätze konnten bisher sämtliche Ereignisse im Elbtunnel Hamburg durch die Feuerwehr erfolgreich bekämpft und weitergehende Schäden verhindert werden.

4 Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte Tunnelvarianten

Basierend auf der Variante T01 wird in aufeinander aufbauenden Untersuchungsschritten analysiert / herausgearbeitet, welche Voraussetzungen notwendig sind, um den Tunnel Leverkusen für den Transport von Gefahrgütern freigeben zu können. Grundlage für die Beurteilung bildet der nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR in Stufe 2a erforderliche Analysetiefgang sowie die hierzu notwendigen Modelle.

4.1 Untersuchungsvarianten

Ereignisse mit Gefahrgutfreisetzen laufen mitunter sehr schnell ab, so dass technische und organisatorische Maßnahmen teilweise nur begrenzte Wirkung zeigen. Im Rahmen dieser Untersuchung stehen daher konstruktive Lösungsmöglichkeiten im Vordergrund, welche die Selbstrettungsmöglichkeiten für Tunnelnutzer verbessern. Folgende Untersuchungsvarianten werden im Hinblick auf ihre Wirkung vertieft analysiert:

- ▶ Untersuchungsvariante 0: T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m
- ▶ Untersuchungsvariante 1: T01 mit verkürzten Notausgangsabständen
- ▶ Untersuchungsvariante 2: T01 mit verlängerter Trennwand und einem Notausgangsabstand von 138,5 m
- ▶ Untersuchungsvariante 3: T01 mit verlängerter Trennwand und verkürztem Notausgangsabstand

Die Analysen zur Überprüfung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten im Tunnel Leverkusen werden für die kritischere Röhre durchgeführt. Aufgrund der Längsneigung und der Querschnittsausbildung wird die Nordröhre des Tunnels Leverkusen (Fahrtrichtung Koblenz) als maßgebend für die Kategorisierung nach ADR erachtet. In den Untersuchungsvarianten 2 und 3 mit verlängerter Trennwand wird die Röhre mit 4 Fahrstreifen als maßgebend beurteilt.

4.2 Untersuchungsszenarien

Entsprechend dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln werden zur Beurteilung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten im Tunnel Leverkusen die in nachfolgender Tabelle 23 aufgeführten Freisetzungsraten mit hierfür geeigneten Simulationsprogrammen abgebildet. Je Untersuchungsvariante ergeben sich somit 14 unterschiedliche Initialereignisse bzw. Untersuchungsszenarien.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

Leitstoff	Aggregat- zustand	Freisetzungsmenge (Ladung)	Freisetzungstyp	Freisetzungsbzw. Umsetzungsursache	Freisetzungsrate (Massenstrom)	Szen. Nr.
Benzin	flüssig	15 t	Kontinuierlich	Leck (100 mm)	20,6 kg/s	1
			Spontan	Behälterversagen	300 kg/s	2
		8 t	Kontinuierlich	Leck (100 mm)	20,6 kg/s	3
			Spontan	Behälterversagen	300 kg/s	4
Propan	druck- verflüssigt	12 t	Kontinuierlich	Leck (50 mm)	36 kg/s	5
			Spontan	Behälterversagen	400 kg/s	6
		1 t	Kontinuierlich	Leck (50 mm)	36 kg/s	7
			Spontan	Behälterversagen	400 kg/s	8
Chlor	druck- verflüssigt	4 t	Kontinuierlich	Leck (50 mm)	45 kg/s	9
			Spontan	Behälterversagen	400 kg/s	10
		50 kg*	Kontinuierlich	Leck (50 mm)	45 kg/s	11
			Spontan	Behälterversagen	400 kg/s	12
TNT	fest	1 t	Spontan	Hohe thermische oder kinetische Energieeinwirkung	-	13
		100 kg	Spontan		-	14

Tabelle 23: Zu betrachtende Untersuchungsszenarien

4.3 Eingangsparemeter / Eingangsdaten Stufe 2a / Untersuchungsgrundlagen

4.3.1 Tunnelgeometrie

Die Untersuchungsvarianten variieren in ihrer Querschnittsausbildung durch die Länge der Trennwand zwischen der Hauptfahrbahn und der Rampenfahrbahn. Zu unterscheiden sind Querschnitte mit und ohne Trennwand.

QUERSCHNITT OHNE TRENnwAND

Die Untersuchungsvarianten 0 und 1 weisen im Bereich der Tunnelinnenstrecke einen 6-streifigen Querschnitt mit Seitenstreifen auf. Die Fahrstreifen werden mit einer Breite von 3,50 m und der Seitenstreifen mit einer Breite von 2,0 m ausgebildet. Beidseitig der Fahrbahn werden 1,0 m breite Notgehweg angeordnet. Zusammen mit 0,50 m breiten Randstreifen an den Fahrbahnaußenrändern ergibt sich eine lichte Weite von 26,00 m. Bei einer Querneigung der Fahrbahn von 2,5 % beträgt die mittlere lichte Höhe 5,18 m. Nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Ausbildung des Querschnitts in den Bereichen ohne Trennwand.

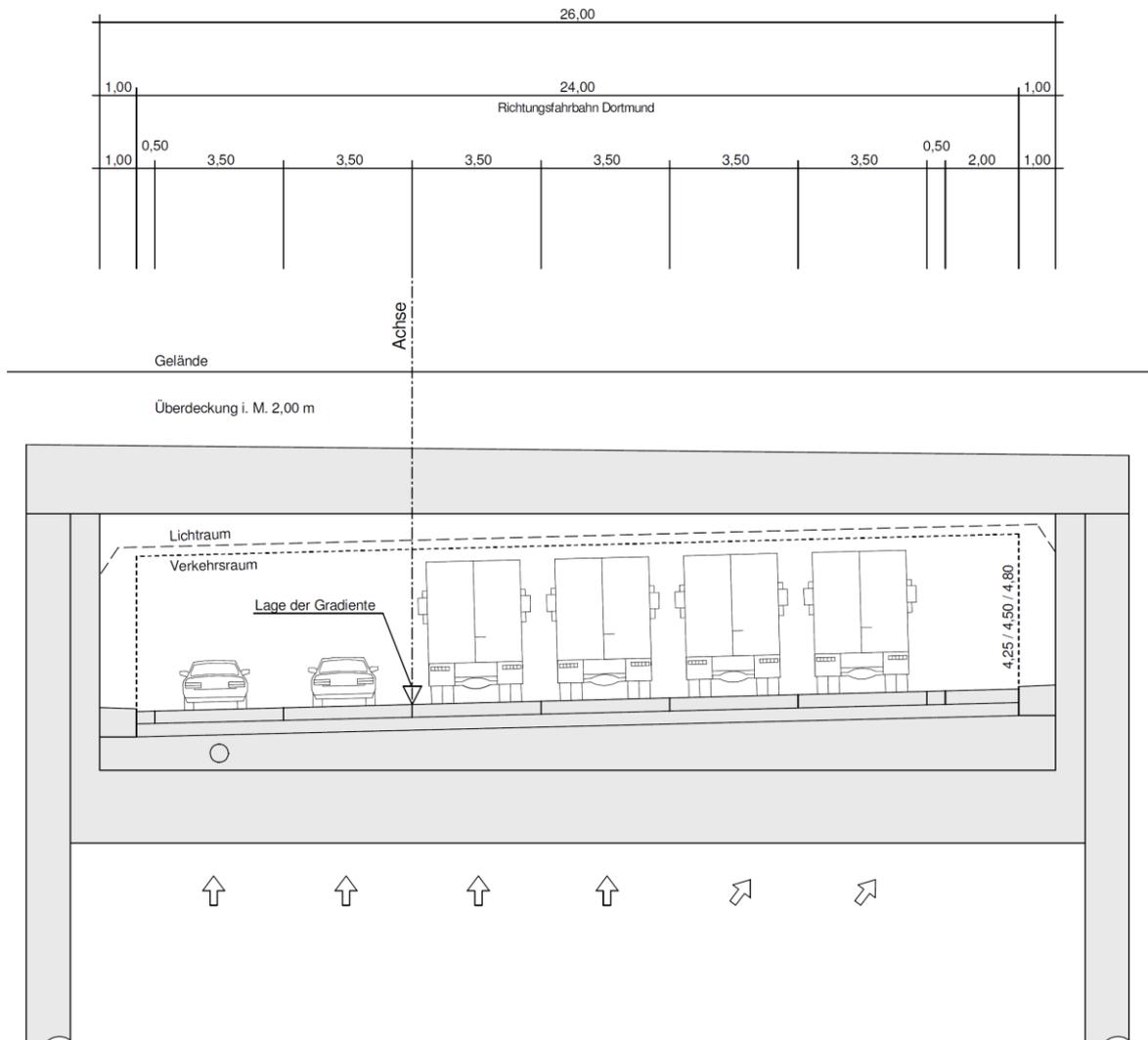


Abbildung 10: 6-streifiger Querschnitt ohne Trennwand (Quelle: StraßenNRW)

QUERSCHNITT MIT TRENNWAND

In den Bereichen mit von der Hauptfahrbahn getrennt ausgeführten Einfahrts- bzw. Ausfahrtsrampen der Untersuchungsvarianten 0 und 1 sowie in den Untersuchungsvarianten 2 und 3 mit verlängerter Trennwand wird der Querschnitt mit je einer Röhre für die Hauptfahrbahn und die Rampenfahrbahn ausgebildet. Die Röhre der Hauptfahrbahn wird als 4-streifiger Querschnitt mit Seitenstreifen und die Röhre der Rampenfahrbahn als 2-streifiger Querschnitt mit Seitenstreifen ausgeführt. Die Fahrstreifen werden 3,50 m breit und die Seitenstreifen 2,0 m breit ausgebildet. Die Ausführung der an den Fahrbahnaußenrändern erforderlichen Randstreifen erfolgt in einer Breite von 0,50 m. Beide Röhren erhalten beidseitig der Fahrbahn 1,0 m breite Notgehwege. Für den 4-streifigen Querschnitt ergibt sich somit eine lichte Weite von 19,0 m und für den 2-streifigen Querschnitt eine lichte Weite von 12,0 m. Die mittlere lichte Höhe wird analog

zum Querschnitt ohne Trennwand mit 5,18 m angenommen. In nachfolgender Abbildung 11 ist die Ausbildung des Querschnitts in den Bereichen mit Trennwand dargestellt.

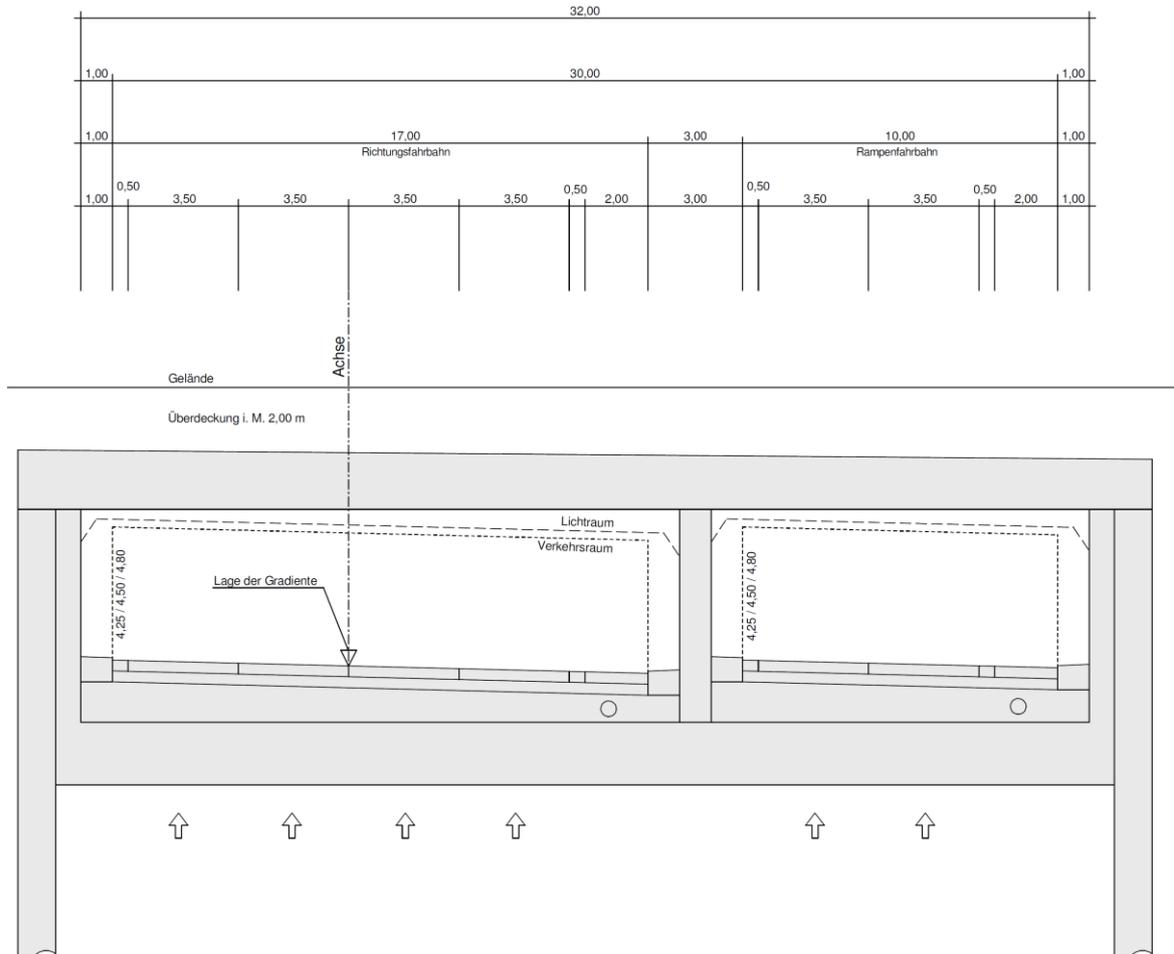


Abbildung 11: 4+2-streifiger Querschnitt mit Trennwand (Quelle: StraßenNRW)

LÄNGSNEIGUNG

Der Tunnel weist in Längsrichtung ein konstantes Gefälle von 0,35 % von Ost nach West auf.

NOTAUSGÄNGE, FLUCHT UND RETTUNGSWEGE

Notausgänge bilden den Übergang in einen sicheren Bereich. Sie werden in äquidistanten Abstand in Tunnelmitte angenommen. Der Fluchtweg führt im Verkehrsraum bis zu einem Notausgang. Der Rettungsweg führt vom Notausgang über die Nachbarröhre ins Freie.

4.3.2 Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung

Das Verkehrsaufkommen wird im Bereich der 6-streifigen Querschnitte mit 64.700 Kfz/d je Fahrtrichtung zugrunde gelegt. Im Bereich mit 4 Fahrstreifen wird ein Verkehrsaufkommen von 43.133 Kfz/d und im Bereich mit 2 Fahrstreifen eine Verkehrsbelastung von 21.567 Kfz/d angenommen. Der Schwerverkehrsanteil beträgt 13,45%. Der Gefahrgutanteil am Schwerverkehr wird auf der sicheren Seite liegend mit 6% abgeschätzt. Die Zeitperiode mit hohem Verkehrsaufkommen am Tag reicht von 6:00 bis 22:00 Uhr und das Zeitintervall mit geringem Verkehrsaufkommen in der Nacht von 22:00 bis 6:00 Uhr. Die Verkehrsstärke pro Stunde wird am Tag zu $1,25 \cdot \text{DTV}/24$ und in der Nacht zu $0,5 \cdot \text{DTV}/24$ abgeschätzt. Im Mittel wird von einem Personenbesetzungsgrad von 1,2 Personen ausgegangen. Die zul. Geschwindigkeit im Tunnel Leverkusen wird gem. RABT auf 80 km/h gesetzt. Eine Zusammenstellung der maßgebenden Verkehrsparameter enthält nachfolgende Tabelle 24.

Parameter Verkehr		6-streifiger Querschnitt	4-streifiger Querschnitt
DTV in maßgebender Röhre		64.700 Kfz/24h	43.133 Kfz/24h
Schwerverkehrsanteil		13,45 %	
Gefahrgutanteil am SV-Verkehr		6 %	
Busanteil am SV-Verkehr		5 %	
Zeitperiode	Tag	6.00-22.00 Uhr	
	Nacht	22.00-6.00 Uhr	
Verkehrsstärke pro Stunde	Tag	$1,25 \cdot \text{DTV}/24$	
	Nacht ⁹	$0,5 \cdot \text{DTV}/24$	
Personenbesetzungsgrad	PKW	1,2	
	LKW	1,2	
	Bus	40	
Geschwindigkeit	PKW	80 km/h	
	LKW	80 km/h	

Tabelle 24: Zusammenstellung der maßgebenden Verkehrswerte

4.3.3 Lüftung

Für den Tunnel Leverkusen ist die Installation einer mechanischen Längslüftung mit Strahlventilatoren vorgesehen. Insgesamt werden gem. der Kostenzusammenstellung¹⁷ für die Lüftungstechnik 36 Strahlventilatoren, d.h. 18 Strahlventilatoren je Röhre, mit einer Leistung von jeweils 37 kW für den Tunnel Leverkusen erforderlich. Zur Steuerung der Lüftung sind 18 Messeinrichtungen für die Strömungsgeschwindigkeit, 18 für die Sichttrübe und 6 für die Kohlenmonoxidkonzentration vorgesehen. Im Zuge der Gefahrgutanalyse wird davon ausgegangen, dass die Lüfter auf 3 Lüfterquerschnitte je Röhre verteilt sind. In den Abschnitten

¹⁷ HBI: T5_2015-08-18_Tunnel-Leverkusen_Spez+Kosten-Lüftung.pdf

mit 6 Fahrstreifen sind je Lüfterquerschnitt 6 Strahlventilatoren vorhanden. In den Abschnitten mit 4 Fahrstreifen werden 4 Strahlventilatoren und in den Abschnitten mit 2 Fahrstreifen werden 2 Strahlventilatoren je Lüfterquerschnitt angenommen. Zur Steuerung der Lüftung wird von folgendem Lüftungskonzept ausgegangen. Im Fall einer Benzin- und Propanfreisetzung wird bei freiem Verkehr eine Längsströmungsgeschwindigkeit von ca. 3 m/s über die Strahlventilatoren eingestellt. Demgegenüber wird im Staufall eine Längsströmungsgeschwindigkeit von ca. 1,5 m/s über die Strahlventilatoren eingestellt. Lüfter in der Nähe des Ereignisortes bleiben hierbei deaktiviert. Im Fall einer Chlorfreisetzung wird die Lüftung verzögert, manuell aktiviert. Bei der Umsetzung von TNT-Ladungen hat das Lüftungsregime keinen Einfluss auf den Druckverlauf und wird daher nicht berücksichtigt.

Die Anordnung der Strahlventilatoren zeigen die nachfolgende Abbildung 12 und Abbildung 13.

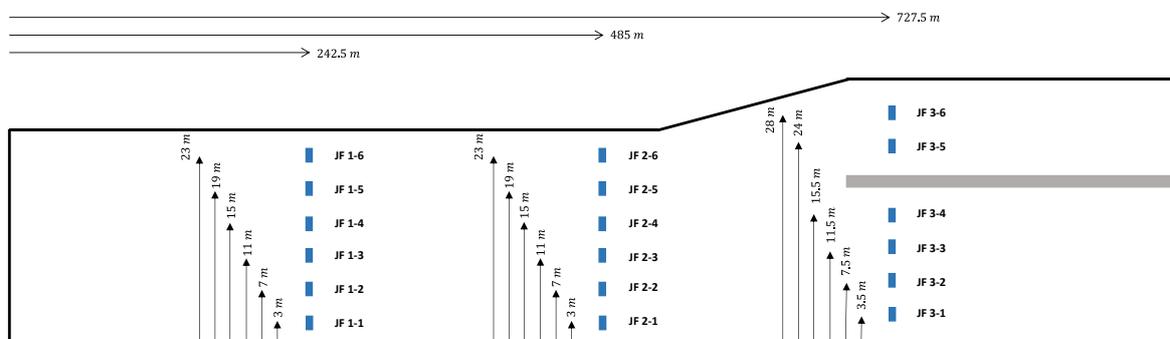


Abbildung 12: Anordnung der Strahlventilatoren bei geplanter Trennwand

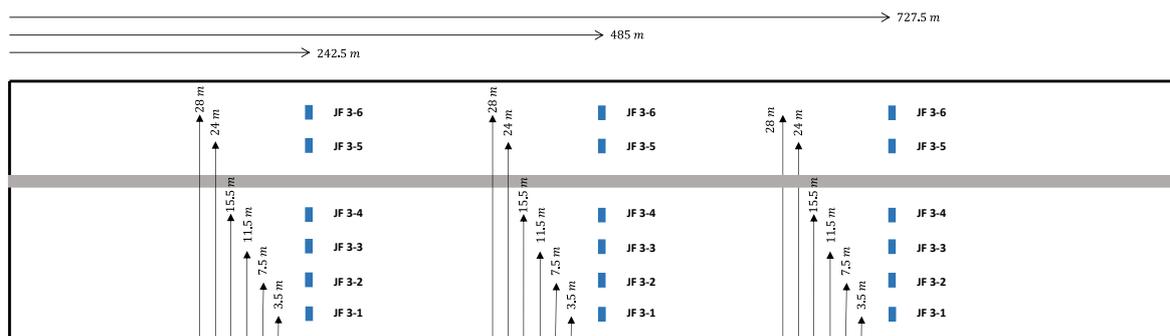


Abbildung 13: Anordnung der Strahlventilatoren bei verlängerter Trennwand

4.4 Häufigkeitsermittlung

4.4.1 Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis

Basierend auf den Berechnungsvorschriften nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunnel gem. ADR ergeben sich für den Tunnel Leverkusen die in Tabelle 25 aufgeführten Freisetzungshäufigkeiten je Leitstoff und Tunnelquerschnitt.

Leitstoff	Freisetzungshäufigkeiten/Jahr			
	Benzin	Propan	Chlor	TNT
6-streifiger Querschnitt	$6,64 \times 10^{-4}$	$5,60 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-6}$	$4,23 \times 10^{-6}$
4-streifiger Querschnitt	$4,43 \times 10^{-4}$	$3,74 \times 10^{-6}$	$1,34 \times 10^{-6}$	$2,82 \times 10^{-6}$

Tabelle 25: Leitstoffbezogene Freisetzungshäufigkeiten je Röhre für den Tunnel Leverkusen

4.4.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf

Entsprechend den Vorgaben im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunnel gem. ADR ergeben sich die in nachfolgender Tabelle 26 aufgeführten Wahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten im Ereignisablauf.

Verzweigung im Ereignisbaum			Leitstoff			
			Benzin	Propan	Chlor	TNT
[1]	Freisetzungsmenge	Groß	5%	5%	5%	5%
		Klein	95%	95%	95%	95%
[2]	Freisetzungsart	Spontan	10%	5%	5%	100%
		kontinuierlich	90%	95%	95%	0%
[3]	Zündung infolge spontaner Freisetzung	Sofort	35%	65%	-	10%
		Verzögert	5%	5%	-	60%
		Keine	60%	30%	-	30%
	Zündung infolge kontinuierlicher Freisetzung	Sofort	15%	25%	-	-
		Verzögert	5%	5%	-	-
		Keine	80%	70%	-	-
[4]	Ereignisort	An einem Notausgang	Abhängig vom			
		Zwischen Notausgängen	Notausgangsabstand			
[5]	Zeitraum	Tag (6-22 Uhr)	85,7%	85,7%	85,7%	85,7%
		Nacht (22-6 Uhr)	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
[6]	Verkehrszustand	Vollstau	0,57%	0,57%	0,57%	0,57%

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

		Freier Verkehr	99,43%	99,43%	99,43%	99,43%
[7]	Detektion erfolgreich	Ja	99% innerhalb 15s	99% innerhalb 15s	99% innerhalb 120s	-
		Nein	1%	1%	1%	-
[8]	Alarmierung	Ja	99%	99%	99%	99%
		Nein	1%	1%	1%	1%
[9]	Tunnelsperrung	Ja	99%	99%	99%	99%
		Nein	1%	1%	1%	1%
[10]	Lüftungssystem aktiviert	Ja	99%	99%	99%	99%
		Nein	1%	1%	1%	1%
[11]	Erhöhtes Schadensausmaß	Ja	99%	99%	99%	99%
		Nein	1%	1%	1%	1%
[12]	Fremdrettung	Eintreffzeit nach Freisetzung	Eintreff- wahrscheinlichkeit		Ausmaßminderung	
		[min]	[%]		[%]	
		< 5	95		30	
		< 10	5		20	
		< 15	0		10	
		< 20	0		5	
		≥ 20	0		0	

Tabelle 26: Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf

4.4.3 Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf

Aufgrund der Verzweigungen im Ereignisablauf ergeben sich bis zu 28.160 Endzustände je Untersuchungsszenario. Die Ermittlung der Anzahl der Endzustände geht aus Tabelle 27 hervor und ergibt sich durch die zeilenweise Multiplikation der Verzweigungsmöglichkeiten. Die Häufigkeiten der Endzustände resultieren aus der Multiplikation der Eintrittshäufigkeit eines Initialereignisses (Gefahrgutfreisetzung) mit den jeweiligen Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf.

Leitstoff	Freisetzungsmenge	Tunnelkategorie nach ADR 2007	Freisetzungstyp spontan / kontinuierlich	Zündung sofort / verzögert	zu untersuchende Ereignisorte	Zeitraum Tag / Nacht	Verkehrszustand frei / Stau	Detektion erfolgreich ja / nein	Alarmierung der Tunnelnutzer mit Detektion ja / nein	Tunnelsperrung a / nein	Lüftungssystem aktiviert ja / nein	weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert	Erhöhtes Ausmaß ja / nein	Beginn Fremddrettung	Abstand Notausgänge	Anzahl Röhren	Betriebszustände RV / GV	Anzahl Szenarien / Endzustände
Benzin	15t	D	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	5.120
	8 t	E	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	5.120
Propan	12 t	B	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	5.120
	1 t	D	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	5.120
Chlor	4 t	C	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	2.560
	50 kg	E	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	2.560
TNT	1 t	B	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	1.280
	100 kg	C	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1	2	5	1	1	1	1.280
																	Σ	28.160

Tabelle 27: Anzahl Endzustände

4.5 Schadensausmaßermittlung

Bei der Ermittlung von Schadensausmaßen zu den jeweiligen Endzuständen ist grundsätzlich zwischen den Initialereignissen der einzelnen Leitstoffe zu differenzieren. Da die Wirkungen infolge einer Gefahrgutfreisetzung von zahlreichen objektspezifischen Merkmalen abhängig sind, lassen sich die Schadensausmaße für die äußerst seltenen Ereignisse nur mit Hilfe von numerischen Simulationsrechnungen (CFD-Berechnungen) ermitteln.

4.5.1 Ermittlung von Einwirkungen (impacts)

Die Ermittlung von Einwirkungen infolge von Bränden, Explosionen und Schadgasfreisetzungen erfordert den Einsatz räumlich und zeitlich hochauflösender numerischer Verfahren. Die numerischen Berechnungen erfolgen hierbei in drei Raumdimensionen durch Lösen der zeitabhängigen Gleichungen für die Massen-, Impuls-, Energie- und Stoffhaltung. Dadurch lassen sich Aussagen zu den Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen im Raum treffen. Eingesetzt werden hierfür die CFD-Codes **Fire Dynamics Simulator (FDS)** und **OpenFOAM**.

Neben der Abbildung komplizierter Geometrien lassen sich mit diesen Codes auch beliebige Ventilationsbedingungen berücksichtigen. Somit eignen sich diese auch zur Abbildung von Lüftungstechnischen Einrichtungen. Das in FDS implementierte Brandmodell erlaubt die realitätsnahe Wiedergabe von spezifischen Energie- und Rauchfreisetzungen. Darüber hinaus lassen sich temperatur- und konzentrationsabhängige Detektoren nachbilden, wodurch das Regeln einer Lüftungsanlage simuliert werden kann. Mit OpenFOAM lassen sich kurzzeitdynamische Vorgänge, wie sie im Fall von Detonationen ablaufen, berechnen.

Zur Durchführung der numerischen Berechnungen sind im Wesentlichen folgende drei Schritte erforderlich:

1. Preprocessing (Dateneingabe)
2. Processing (Berechnung)
3. Postprocessing (Datenausgabe und Visualisierung)

Das **Preprocessing** umfasst das Modellieren des Tunnelbauwerks mit seinen geometrischen und strömungsmechanischen Eigenschaften. Hierzu ist zunächst eine Diskretisierung des Rechenraums durch Zerlegung in endlich viele Punkte (Knoten) durchzuführen. Die Auflösung ist hierbei abhängig von den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Speicher, Rechenleistung) sowie der gewünschten Genauigkeit der geometrischen Abbildung und der Rechenergebnisse. Die Abbildung von Ventilationsbedingungen erfolgt unter Berücksichtigung meteorologischer und Lüftungssystemspezifischer Rand- und Anfangsbedingungen in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Lüftungskonzeptes.

Nachfolgende Abbildung 14 zeigt die 3D-Modellierung der Nordröhre des Tunnels Leverkusen (Fahrtrichtung Koblenz).

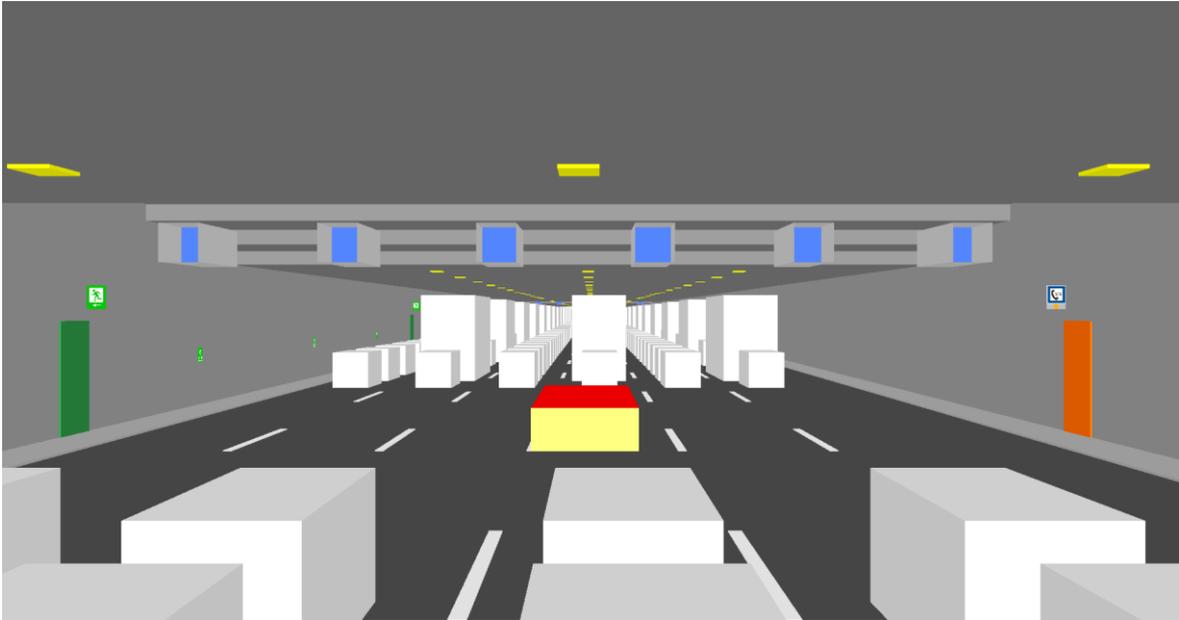


Abbildung 14: 3D-Modellierung des Tunnels Leverkusen

Die eigentliche Berechnung erfolgt anschließend durch den **Processor**. Die erforderliche Rechenzeit ist hierbei direkt abhängig von der Größe des Rechengebietes und der gewählten Auflösung. Eine Halbierung der Auflösung führt beispielsweise zu einer Verachtfachung der Rechenzeit und des erforderlichen Speichers.

Als **Postprocessing** wird die Behandlung der Daten nach Durchführung der Berechnungen bezeichnet. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die Visualisierung der Rechenergebnisse. Dadurch lassen sich Aussagen über die Wirkung einzelner Ausstattungsmerkmale, und wenn erforderlich, von Maßnahmen erzielen. Diese können zur Ableitung von entsprechenden Lüftungskonzepten bzw. deren Verifizierung dienen, die für Brand und Schwergasausbreitungen geeignet sind. Die Darstellung der Rechenergebnisse erfolgt sowohl in 3D- und 2D-Visualisierungen als auch in Diagrammform.

Die drei Simulationsschritte des Preprocessing, Processing und Postprocessing müssen für jedes zu untersuchende Szenario durchlaufen werden.

4.5.1.1 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Benzinfreisetzung

Bei der Freisetzung von Benzin kommt es ausgehend von der Freisetzungsort zu verschiedenen Brandsituationen. Im Falle der spontanen Freisetzung werden in kurzer Zeit große Mengen im Verkehrsraum freigesetzt (300 kg/s). Aufgrund der Zusammensetzung aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoffen gibt es keinen definierten Verdampfungspunkt, sondern eher einen Verdampfungsbereich. Bei den meisten Bestandteilen liegt er so hoch, dass es zu einer Lachenbildung am Austrittsort kommt. Die Lache erreicht auch die Schlitzrinne, durch die ein Teil des auslaufenden Benzins abgeleitet wird.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

Im Rahmen der Simulationen entzündet sich die Lache bereits nach kurzer Zeit (z.B. durch Funkenflug oder an überhitzten Fahrzeugteilen). Das entstandene Feuer entwickelt innerhalb kurzer Zeit Brandraten von mehreren 100 MW. Abbildung 15 zeigt beispielhaft eine Situation unmittelbar nach Brandbeginn.

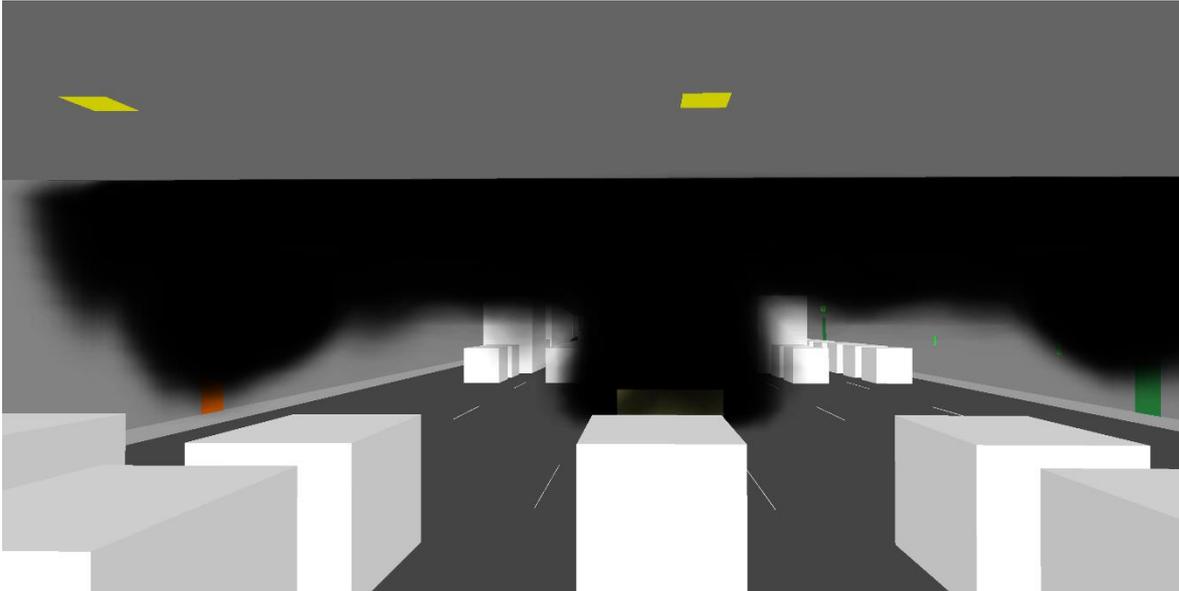


Abbildung 15: Darstellung einer spontanen Freisetzung von Benzin im Tunnel Leverkusen (Nordröhre)

In Abbildung 16 ist die Raumentwicklung im Falle eines Benzinbrandes bei spontaner Freisetzung bei „freiem Verkehr“ dargestellt. Im Brandnahbereich erfolgt die Rauchausbreitung sehr rasch. Es ist zu erkennen, dass aufgrund der großen Freisetzungsmengen der gesamte Tunnelquerschnitt verrauchte ist.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

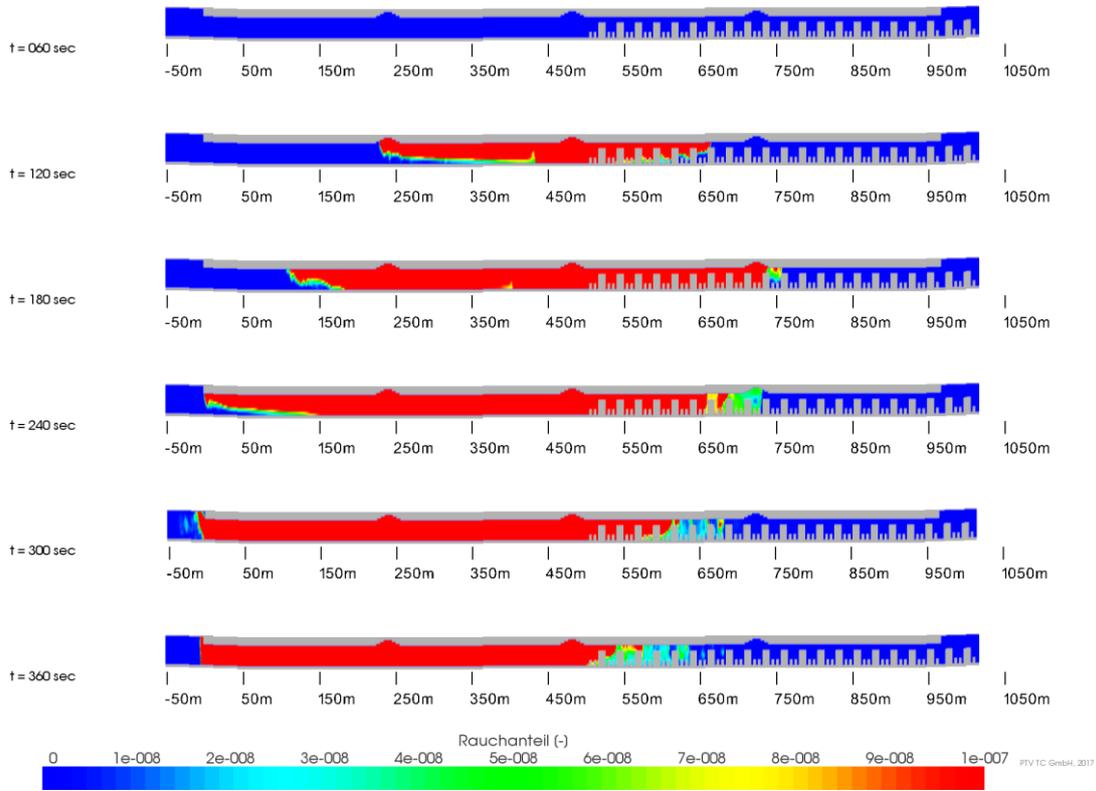


Abbildung 16: Berechnete Rauchausbreitung infolge eines Benzinbrandes bei spontaner Freisetzung bei freiem Verkehr im Tunnel Leverkusen

4.5.1.2 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Propanfreisetzung

Propan breitet sich aufgrund seines niedrigen Verdampfungspunktes sehr schnell als Gaswolke im Verkehrsraum aus. In hohen Konzentrationen kann es unverbrannt narkotisierend wirken. Bei der Zündung eines Propan-Luft-Gemisches läuft eine sehr schnelle Verbrennung ab, die sich abhängig von der Freisetzungsart zu einem BLEVE- oder Freistrahbrand entwickeln kann. In der folgenden Abbildung 17 ist ein Simulationsbeispiel zur Flammen- und Rauchausbreitung infolge einer Propanfreisetzung dargestellt.

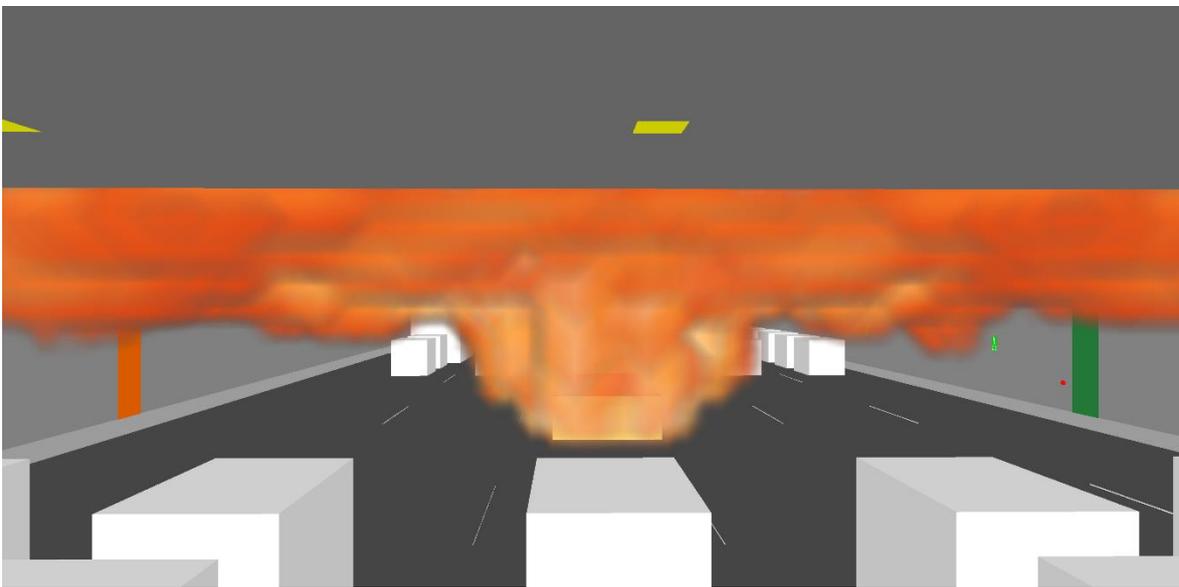


Abbildung 17: Darstellung einer spontanen Freisetzung von Propan im Tunnel Leverkusen

In Abbildung 18 ist die Temperaturentwicklung im Falle eines Freistrahbrandes bei kontinuierlicher Freisetzung im Vollstau dargestellt. Im Brandnahbereich erfolgt der Temperaturanstieg sehr rasch, sodass eine Minute nach Brandausbruch in einem Bereich von mehreren 100 m letale Temperaturen vorherrschen.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

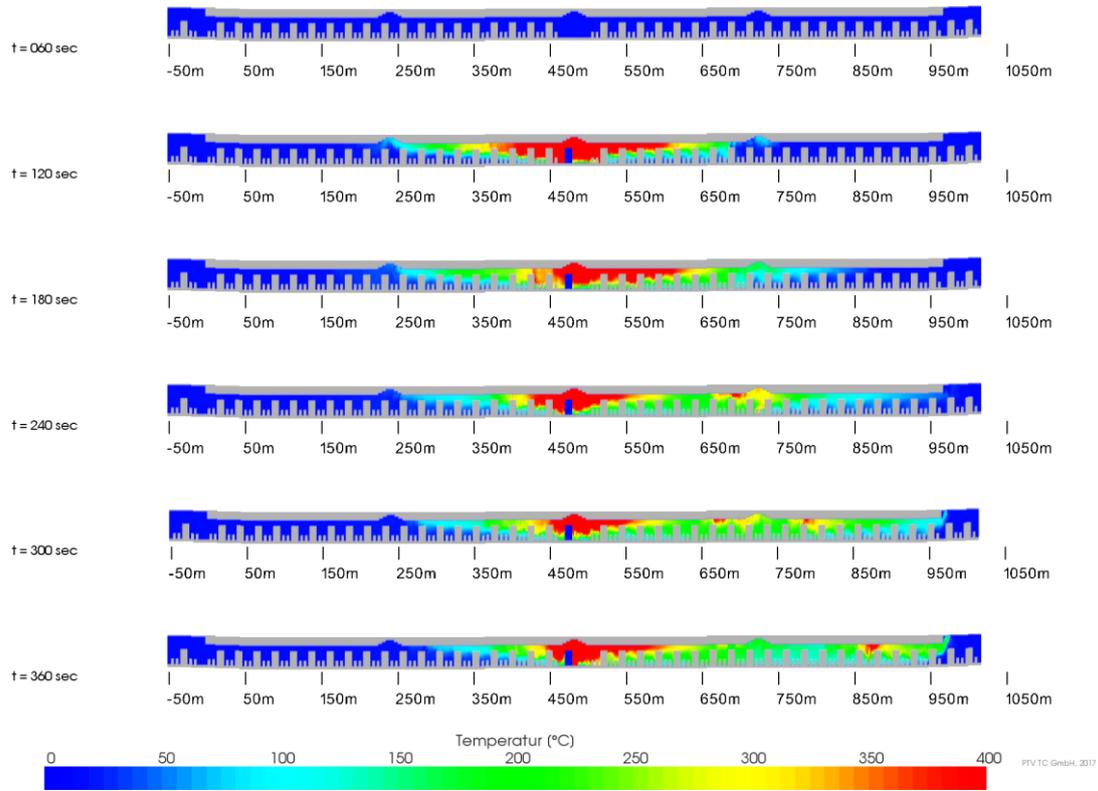


Abbildung 18: Berechnete Temperaturen infolge eines Freistrahlsbrands bei kontinuierlicher Propanfreisetzung (30 kg/s) und Stau im Tunnel Leverkusen

4.5.1.3 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer Chlorfreisetzung

Charakteristisch für eine Chlorfreisetzung ist das ausgeprägte Schwergasverhalten von Chlor aufgrund seiner deutlich höheren Dichte als Luft. Dadurch treten die höchsten Konzentrationen im Fahrbahnbereich bzw. im unteren Querschnittsbereich auf, d.h. in Bereichen, in denen sich Tunnelnutzer aufhalten. Die hohe Dichte führt auch dazu, dass sich freigesetztes Chlor vorrangig zum tieferliegenden Portal hin ausbreitet.

Nachfolgende Abbildung 19 zeigt die kontinuierliche Freisetzung von flüssigem Chlor aus einem Leck mit einer Freisetzungsrate von 45 kg/s. Abhängig von der insgesamt verströmten Menge entspricht dies dem Leitstoffszenario 5 bzw. 6 (siehe Kapitel: 4.2).

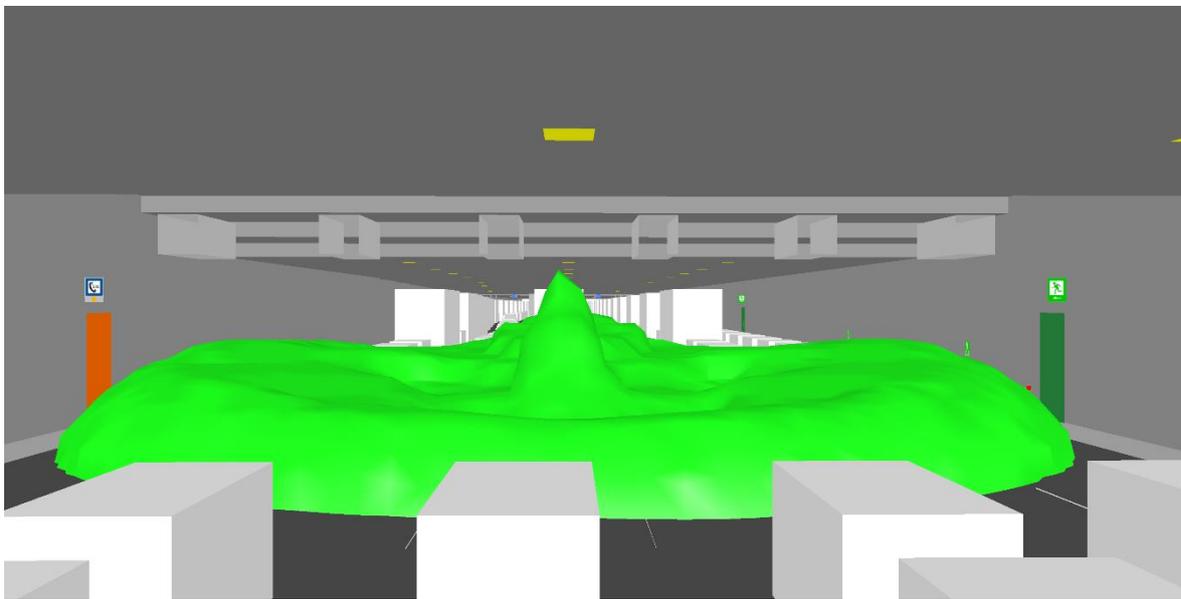


Abbildung 19: Darstellung der kontinuierlichen Freisetzung von Chlor im Tunnel Leverkusen

Da es keine direkte (automatische) Chlorgasdetektion in Tunneln gibt, wird von einer verzögerten Reaktion bei einem Ereignis mit Chlor ausgegangen. Sie erfolgt erst 2 Minuten nach Freisetzungsbeginn. Abbildung 20 zeigt, wie sich Chlorgas infolge einer spontanen Freisetzung von 4.000 kg flüssigem Chlor innerhalb eines Tunnels ausbreitet. Die Freisetzung des Chlors erfolgt zur Simulationssekunde 60.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

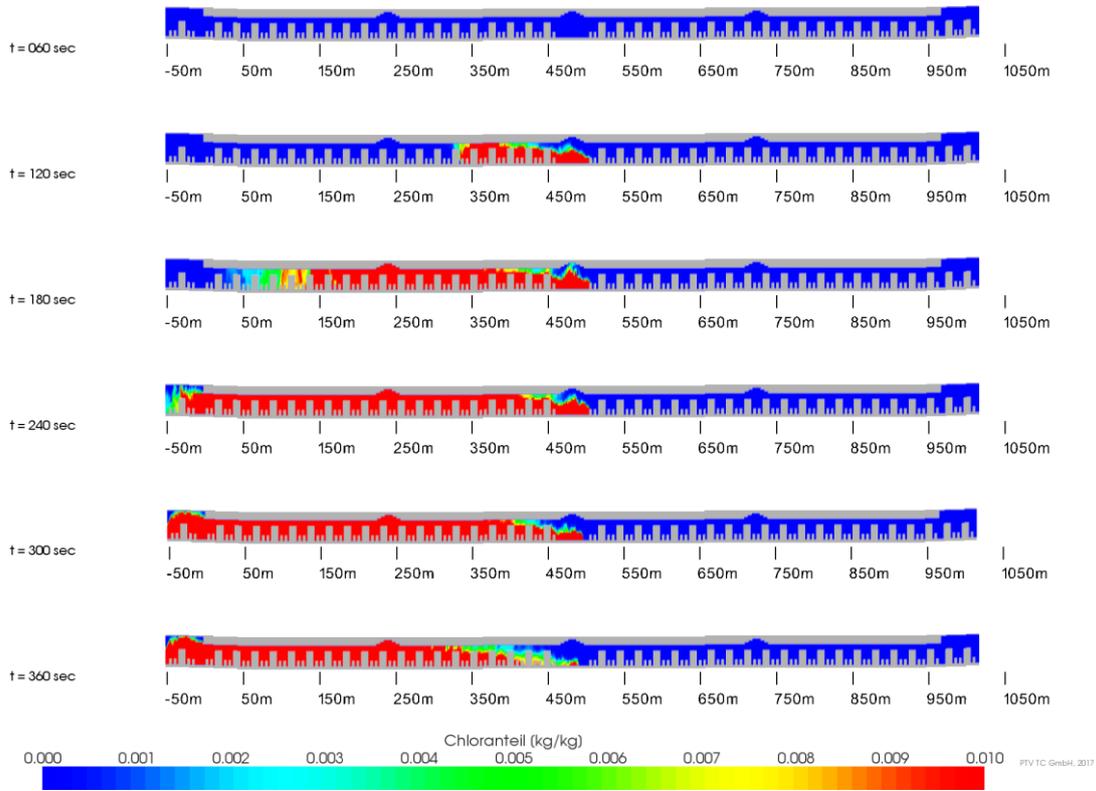


Abbildung 20: Berechnete Konzentrationen infolge einer spontanen Chlor-Freisetzung bei Stau

4.5.1.4 Ermittlung von Einwirkungen infolge einer TNT-Freisetzung

Bei der Detonation (Blast) von explosionsgefährlichen Stoffen kommt es in der Nähe der Ladung zu einem sehr schnellen und hohen Druckanstieg (siehe Abbildung 21). Dadurch wird eine Schockwelle ausgelöst, die sich zunächst mit Überschallgeschwindigkeit ausbreitet. In weiterer Entfernung zur Ladung geht diese Schockwelle in eine gewöhnliche Stoßwelle über, die sich dann mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Die Zerstörungswirkung einer Explosion ergibt sich aus der Stärke der Druckwelle, d.h. der Höhe der Druckamplitude (Explosionsspitzenüberdruck) und der Zeitdauer der Druckwirkung (Dauer der sog. positiven Druckphase). Im Gegensatz zum Leitstoff Propan ist bei einer Detonation die entstehende Hitze-wirkung jedoch vernachlässigbar, da die Druckwirkung deutlich überwiegt und somit für das zu erwartende Schadensausmaß maßgebend ist. In Tunneln kann es zu Verdämmungseffekten (Reflektionen) kommen, wodurch die Wirkung weiter verstärkt wird.

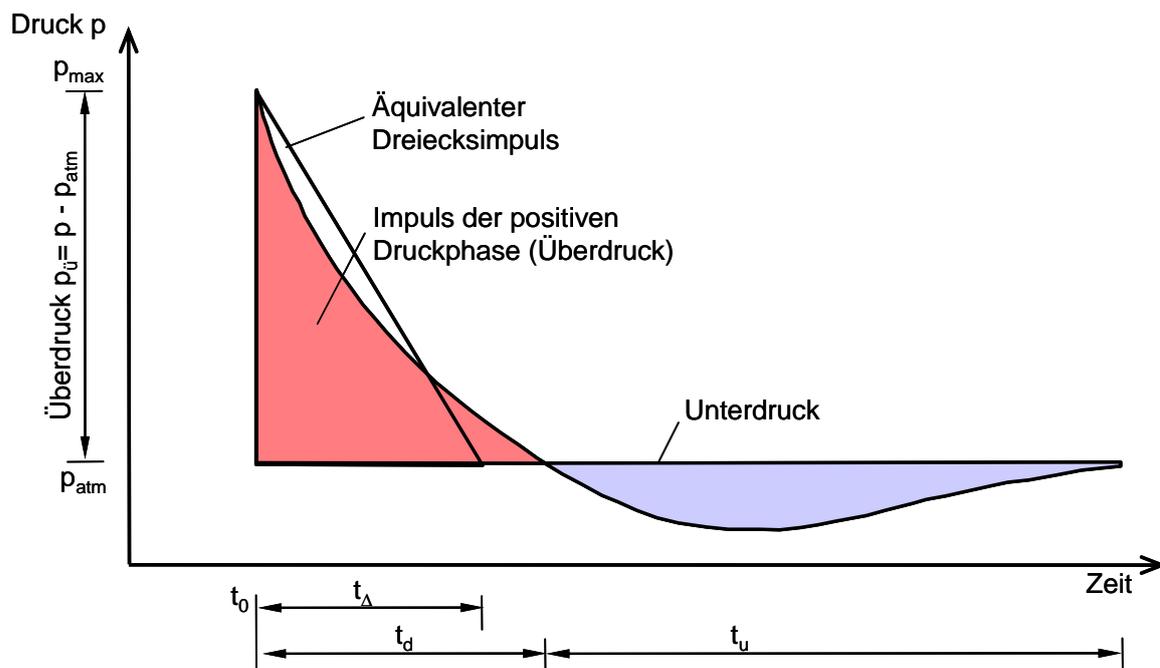


Abbildung 21: Detonation

In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist eine Visualisierung der numerischen Berechnungen zur Druckausbreitung infolge einer Detonation von 100 kg TNT zu unterschiedlichen Zeitpunkten beispielhaft abgebildet. Zur besseren Übersicht wird dabei ein Tunnelausschnitt im Nahbereich der Freisetzung gewählt. Die Druckwelle breitet sich innerhalb weniger Millisekunden über den gesamten Tunnelquerschnitt aus.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

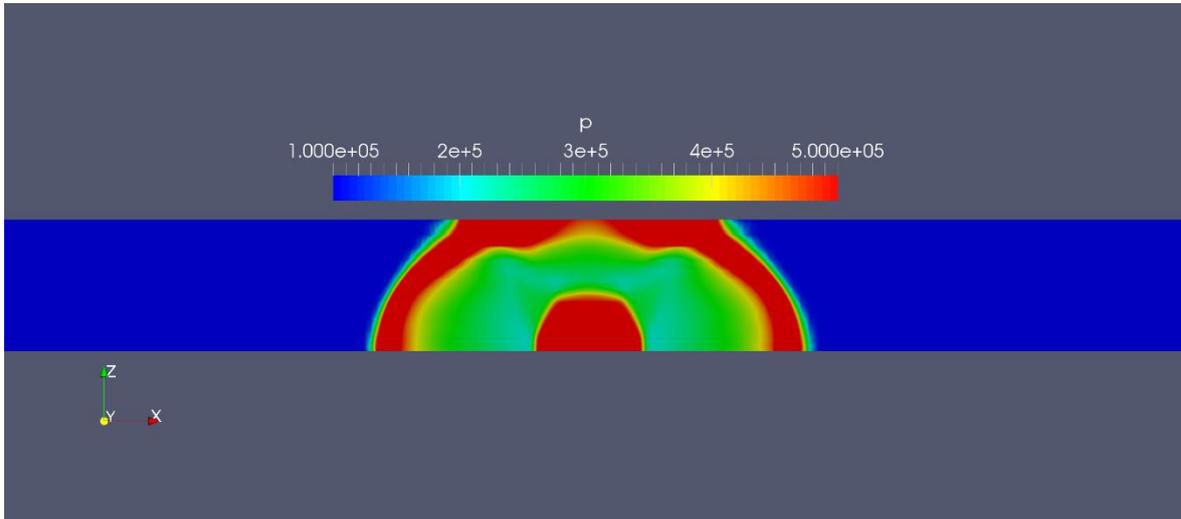


Abbildung 22: Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 100 kg TNT bei Detonationsbeginn (3ms)

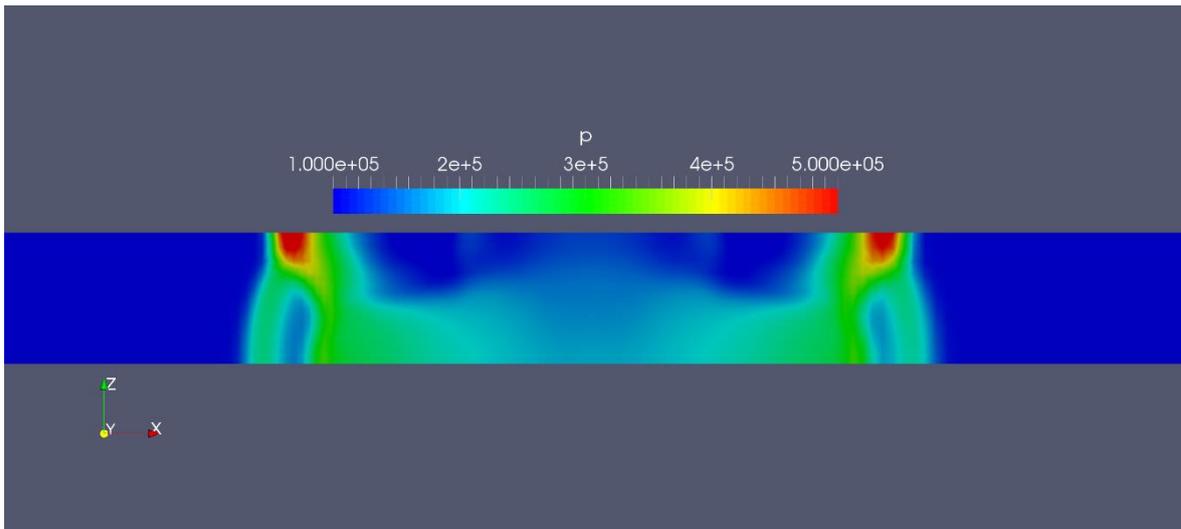


Abbildung 23: Berechnete Druckwerte infolge der Detonation von 100 kg TNT bei Detonationsbeginn (10 ms)

4.5.2 Ermittlung von Auswirkungen (consequences)

Basierend auf den numerischen Berechnungen werden in Abhängigkeit der raum- und zeitabhängigen Einwirkgrößen (Druck, Temperatur, Konzentrationen) Auswirkungen auf die Tunnelnutzer ermittelt.

Die Bestimmung von personenbezogenen Schadensausmaßen erfolgt hierbei mittels Selbstrettungsbereichen unter Berücksichtigung von dosisabhängigen Letalitäten, mittleren Fluchtgeschwindigkeiten sowie dem Abstand von Notausgängen. Durch Überlagerung dieser Selbstrettungsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl im Gefahrenbereich erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen.

4.5.2.1 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Benzinfreisetzung

Auf ihrer Flucht werden Tunnelnutzer im Wesentlichen durch den Einfluss von Rauch behindert, bestehend aus den Rußpartikeln und Rauchgasen. Rußpartikel führen zu einer Reduzierung der Sicht und Orientierung und bewirken starke Irritationen der Atemwege und Schleimhäute. Mit zunehmender Expositionsdauer kommen noch Einflüsse durch die Toxizität der Rauchgase und der Temperatureinwirkung hinzu (Mayer, 2006).

Untersuchungen haben ergeben, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt von der vorhandenen Sichtweite abhängig ist. Wie aus Abbildung 24 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i.d.R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.

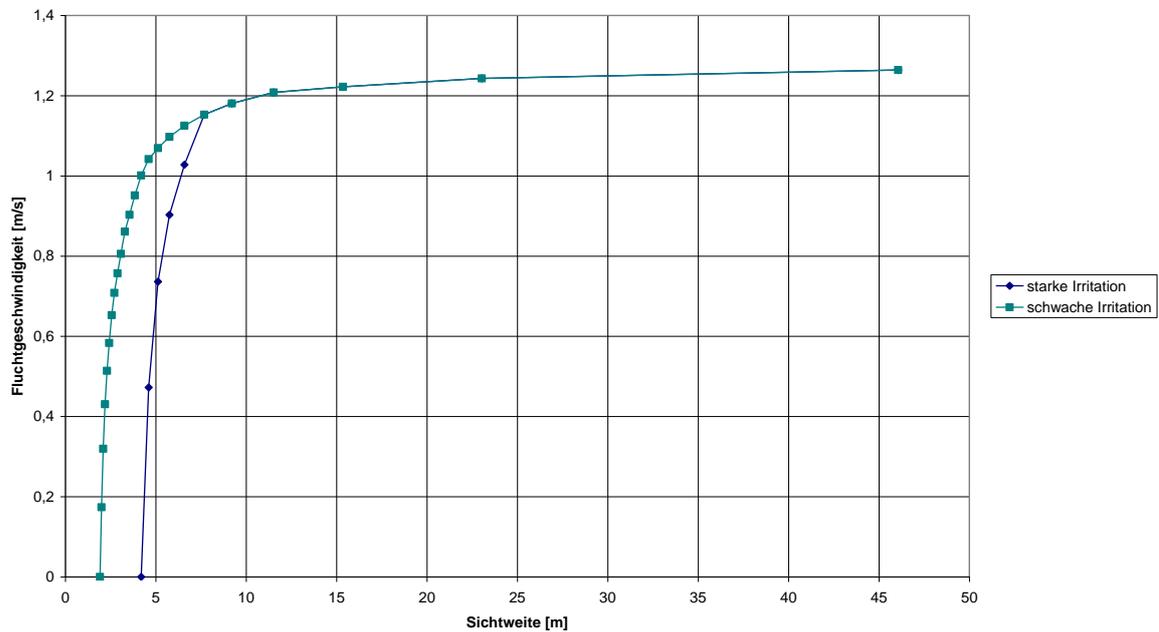


Abbildung 24: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte (Mayer, 2006)

Durch Überlagerung dieses Zusammenhanges mit den numerisch berechneten Sichtweiten lassen sich in Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit und dem Notausgangsabstand Selbstrettungsbereiche ableiten.

Abbildung 25 zeigt exemplarisch die infolge einer spontanen Freisetzung von Benzin bei freiem Verkehr für den Tunnel Leverkusen in Fahrtrichtung Koblenz (Nordröhre) ermittelten Selbstrettungsbereiche. Über die Verknüpfung der Selbstrettungsbereiche mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich dann für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenzahlen bestimmen.

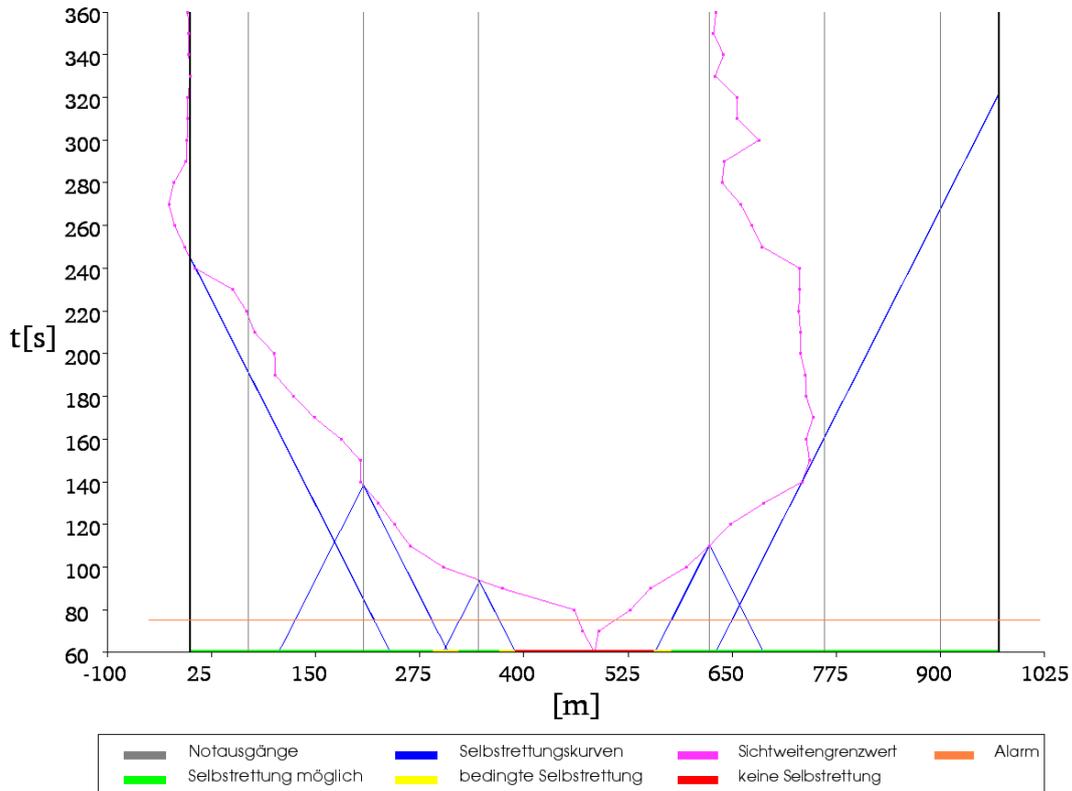


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung von Selbststretkungsbereichen im Tunnel Leverkusen infolge einer spontanen Freisetzung von Benzin an einem Notausgang bei freiem Verkehr (Notausgangsabstand 138,5 m)

4.5.2.2 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Propanfreisetzung

Im Fall einer Propanfreisetzung dominieren aufgrund der Flammenausbreitung die Effekte infolge Temperatureinwirkung. Die dabei freigesetzte Energie kann auf den Menschen sowohl durch Wärmestrahlung als auch durch konvektive Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelbaren Flammenbereich, während durch konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche transportiert werden kann. Die Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Verbrennungen oder Wärmestaubbildung im menschlichen Organismus führen. Im Allgemeinen führen kurze Expositionzeiten aufgrund der körpereigenen Wärmekapazität zu keiner signifikanten Erhöhung der Körpertemperatur. Jedoch können bereits kurze Expositionzeiten zu Verbrennungen auf der Haut und im Atemtrakt führen. Zur Ermittlung der Schadensausmaße wird der in nachfolgender Abbildung 26 dargestellte Zusammenhang zwischen Temperatur und Einwirkzeit nach Purser verwendet.

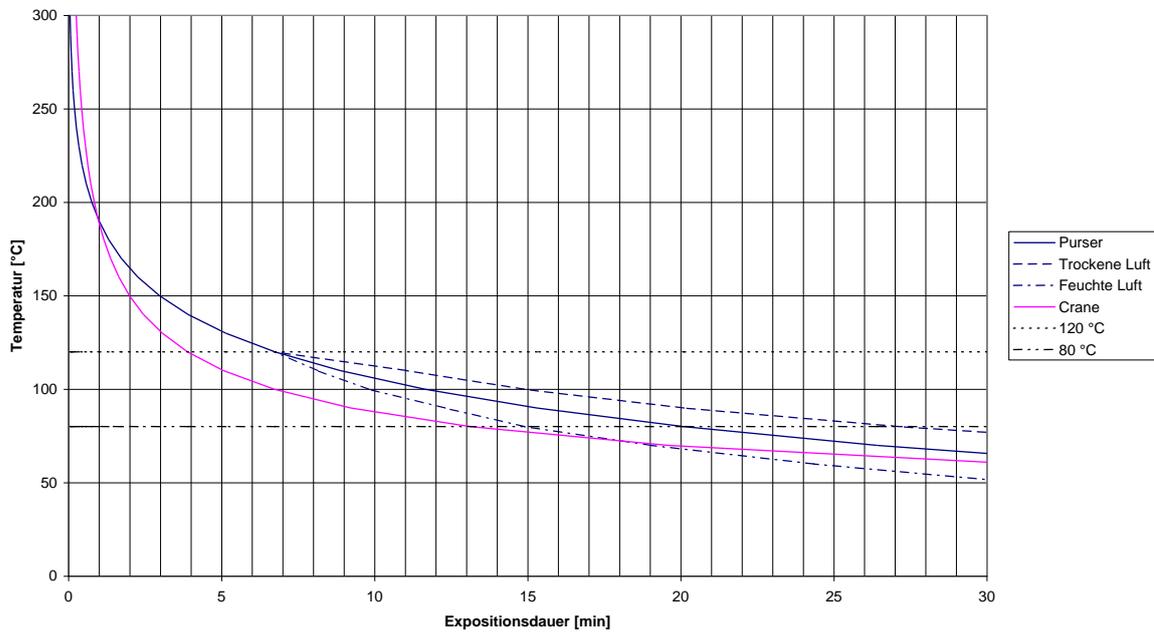


Abbildung 26: Letalitäten infolge Temperatureinwirkung (Mayer, 2006)

Auf Basis dieses Zusammenhangs werden mit Hilfe der numerischen Berechnungen zur Temperaturverteilung die Selbstrettungsbereiche in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit, dem Notausgangsabstand und der Detektionszeit bestimmt.

Über die anschließende Verknüpfung der Selbstrettungsbereiche mit den verkehrszustandsabhängigen Personendichten werden dann bereichsbezogen die jeweiligen Betroffenenzahlen ermittelt.

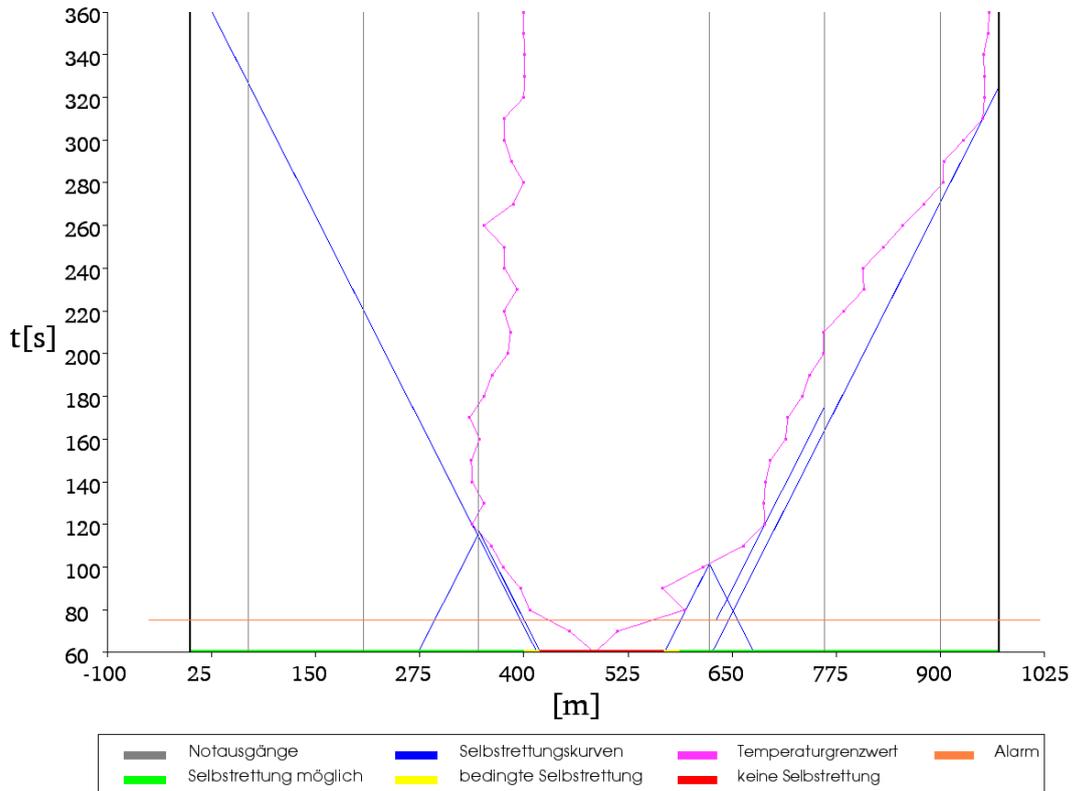


Abbildung 27: Exemplarische Darstellung von Selbstrettungsbereichen infolge eines Freistrahbrandes im Tunnel Leverkusen an einem Notausgang bei Stau (Notausgangsabstand 138,5 m)

4.5.2.3 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer Chlorfreisetzung

Chlor weist aufgrund seiner Dichte ($3,214 \text{ kg/m}^3$) bei der Ausbreitung ein ausgeprägtes Schwergasverhalten auf. Bei der Inhalation von Chlor kommt es zu starker Irritationen der Atemwege, Augen und Haut, da sich in Verbindung mit Feuchte hypochlorige Säure und Salzsäure bilden, die das Gewebe angreifen. Chlorkonzentrationen von ca. 0,5 % in der Atemluft sind für den Menschen tödlich.

Zur Ermittlung der Wirkungen durch Chlorexposition wird die Probitfunktion gemäß den Vorgaben der Tunnelkategorisierung gemäß ADR verwendet. In nachfolgender Abbildung 28 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt.

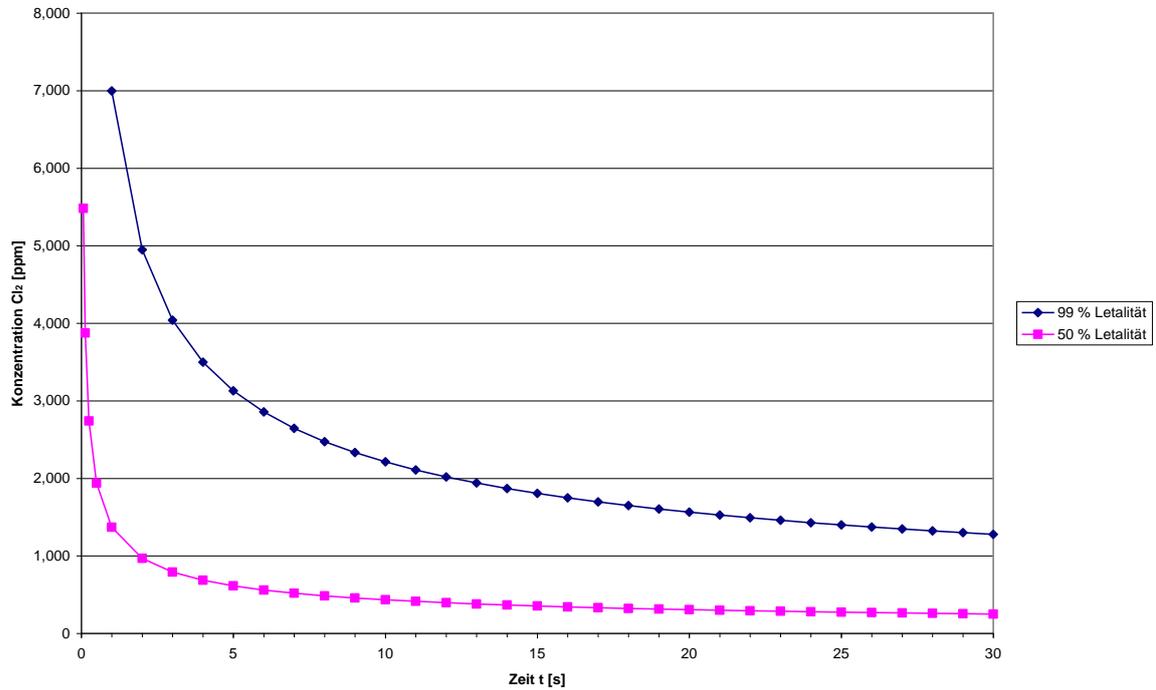


Abbildung 28: Letalitäten infolge Chlorexposition

Durch Überlagerung dieses zeitabhängigen Zusammenhanges mit den numerisch berechneten Chlorkonzentrationen können in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit, dem Notausgangsabstand und der Alarmierung Selbstrettungsbereiche bestimmt werden. In Abbildung 29 sind die entsprechenden Selbstrettungsbereiche dargestellt. Die Bestimmung der Betroffenzahlen erfolgt schließlich über die Verknüpfung der berechneten Personendichten mit den Selbstrettungsbereichen.

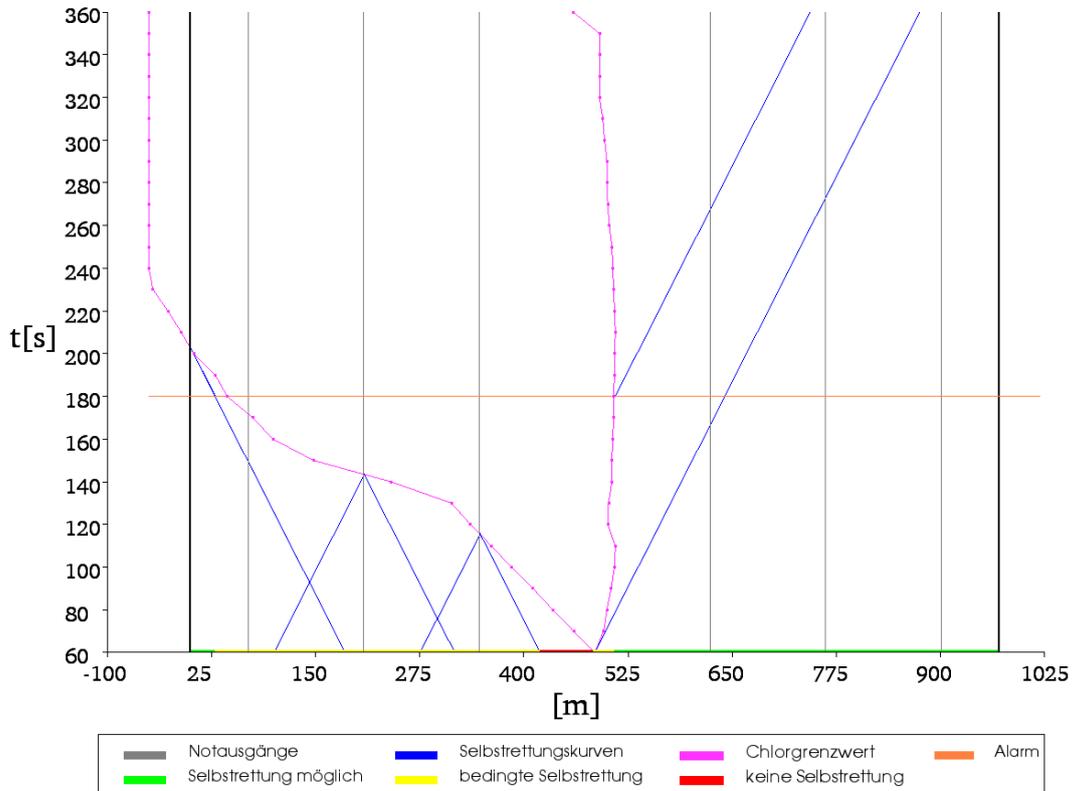


Abbildung 29: Exemplarische Darstellung von Selbststreckungsbereichen infolge einer Chlorfreisetzung im Tunnel
Leverkusen an einem Notausgang bei Stau (Notausgangsabstand 138,5 m)

4.5.2.4 Ermittlung von Auswirkungen infolge einer TNT-Freisetzung

Die infolge einer Detonation entstehende Druckwelle führt bereits ab einem Überdruck von 40 kPa zu schwerwiegenden Personenschäden. Ab einem Überdruck von ca. 180 kPa ist mit einer Letalität von 1 % und ab einem Überdruck von 350 kPa mit einer Letalität von 99 % der exponierten Personen zu rechnen. Den Zusammenhang zwischen Personenschäden und Überdruck zeigt nachfolgende Abbildung 30.

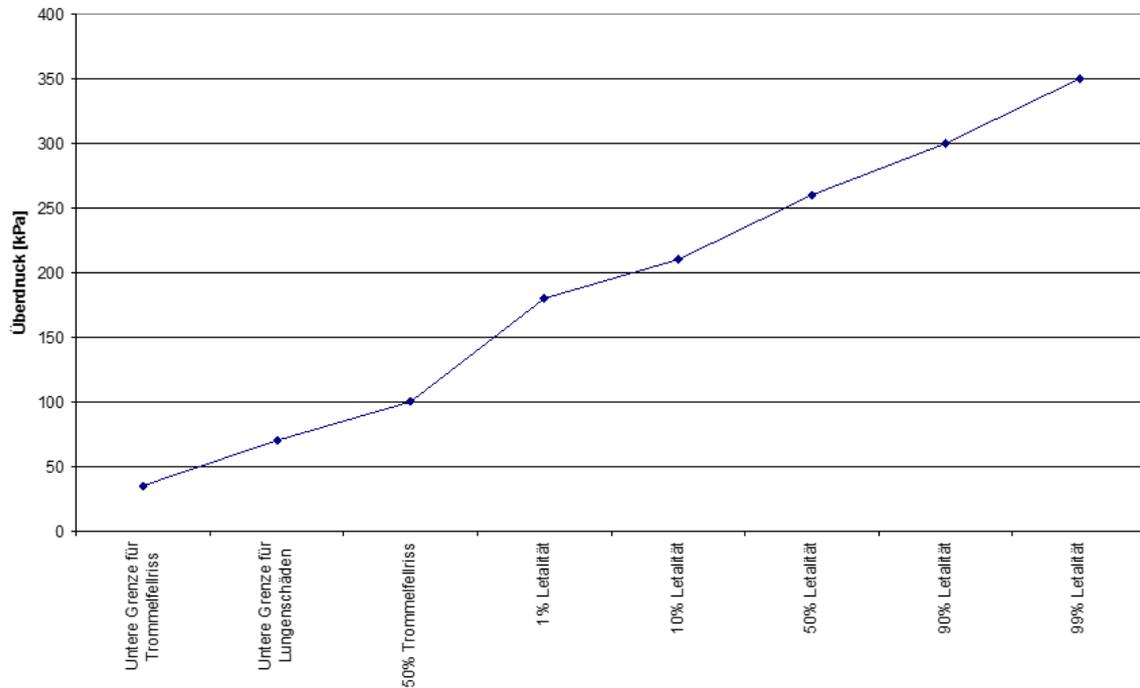


Abbildung 30: Personenschäden infolge Überdrucks

Ausgehend vom simulierten Verlauf des Drucks werden anhand von Letalitätskenn-größen die Personenschäden im Tunnel bei einer TNT-Freisetzung ermittelt. Abbildung 32 ist zu entnehmen, dass bei der Freisetzung von 1.000 kg TNT in einer Entfernung bis zu ca. 160 m beidseits des Freisetzungsortes über 90 % der Tunnelnutzer betroffen sind. Über eine Strecke von ca. 100 m auf beiden Seiten des Freisetzungsortes ist hiernach mindestens die Hälfte der Personen, die sich dort befinden, betroffen.

Abbildung 31 zeigt, dass bei der kleineren Freisetzung von 100 kg der Spitzendruck deutlich schneller abfällt. Hier liegt die Grenze, bis zu der mindestens 50 % der Tunnelnutzer betroffen sind bei ca. 20 m stromauf- und stromabwärts des Explosionsortes.

Ausgehend vom simulierten Verlauf des Drucks werden anhand dieses Zusammenhangs die Personenschäden im Tunnel infolge einer TNT-Umsetzung ermittelt. Die infolge von Druckeinwirkungen im Tunnel Leverkusen zu erwartenden Letalitätsbereiche zeigt Abbildung 31 für eine 100 kg TNT Umsetzung und Abbildung 32 für eine 1000 kg TNT Umsetzung. Im Freisetzungsnahbereich liegen die hierbei zu verzeichnenden Drücke deutlich über den von Menschen kompensierbaren Belastungen. Durch Überlagerung dieser Letalitätsbereiche mit der verkehrszustandsabhängigen Personenanzahl erfolgt schließlich eine Quantifizierung der betroffenen Personen.

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

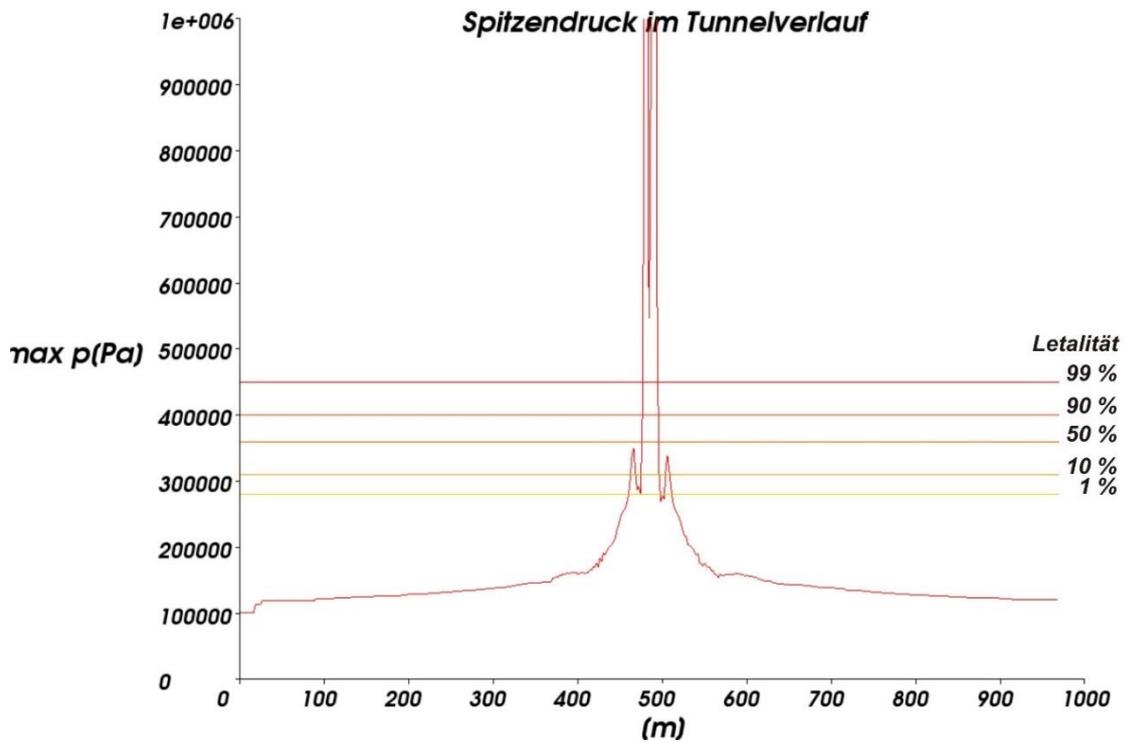


Abbildung 31: Entfernungsabhängiger Verlauf des Drucks im Tunnel Leverkusen (100 kg Ladung)

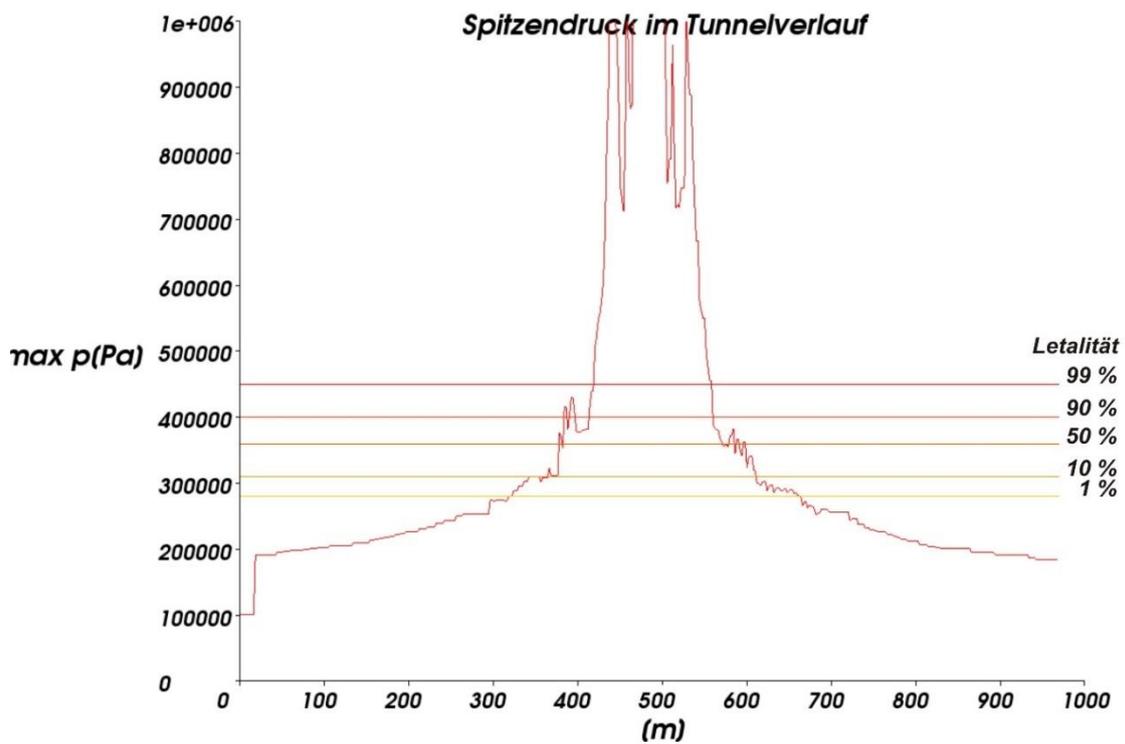


Abbildung 32: Entfernungsabhängiger Verlauf des Drucks im Tunnel Leverkusen (1t Ladung)

4.6 Risikoermittlung und -bewertung

Im Folgenden werden auf Basis der ermittelten Häufigkeiten für die Endzustände im Ereignisablauf und den korrespondierenden Schadensausmaßen die Risiken in Abhängigkeit des jeweiligen Freisetzungsszenarios berechnet und mittels der Vergleichsgeraden nach dem Verfahren zur Kategorisierung bewertet. Wird diese Vergleichsgerade von der Gesamtsummenhäufigkeitslinie einer Kategorie überschritten, so ist der Tunnel für den Transport von Gefahrgütern dieser Kategorie zu beschränken.

4.6.1 Untersuchungsvariante 0: T01 – NA 138,5 m

In Abbildung 33 sind Summenkurven für die Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT sowie deren Überlagerung für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 % dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass das sowohl in der Überlagerung der Leitstoffe als auch durch den Leitstoff Benzin mit der Freisetzungsmenge von 8 t signifikant überschritten wird. Unter den gegebenen Randbedingungen dieser Untersuchungsvariante kann der Tunnel somit nicht für den Transport von Gefahrgütern freigegeben werden. Es werden daher weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen erforderlich, um den Tunnel für Gefahrgüter freigegeben zu können. Es zeigt sich ferner, dass nicht der Leitstoff Propan zur Überschreitung des Grenzkriteriums führt.

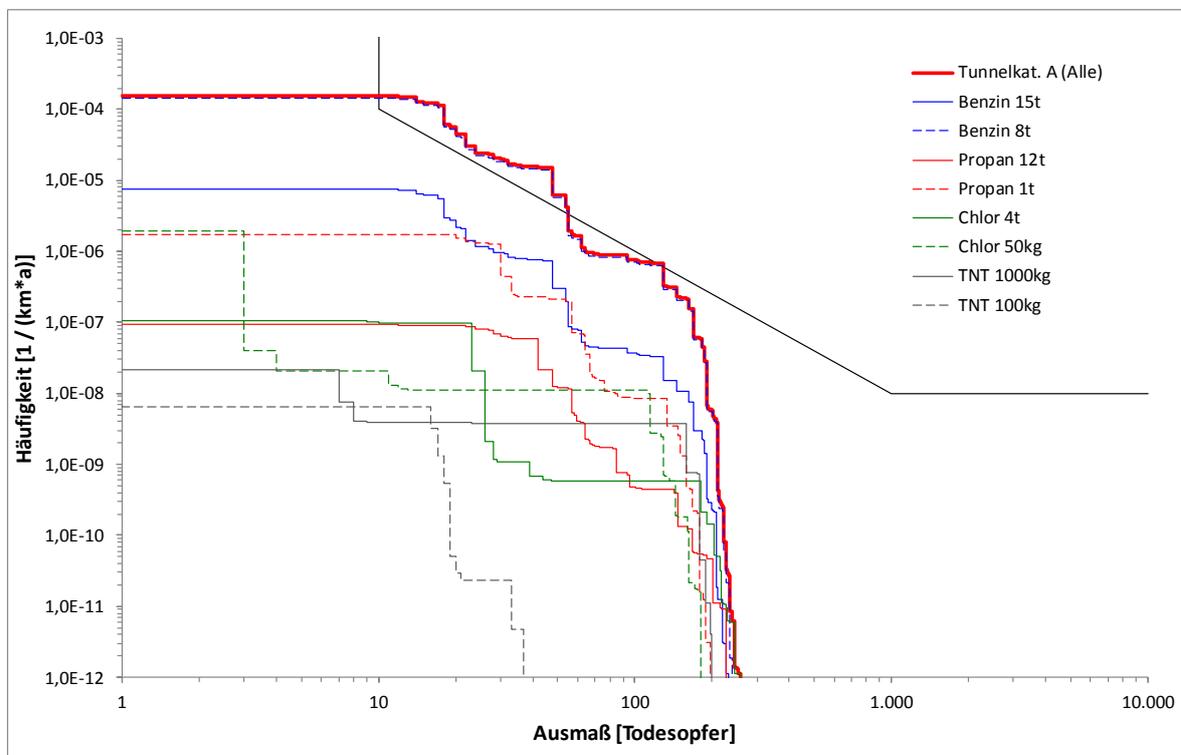


Abbildung 33: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %

4.6.2 Untersuchungsvariante 1-1: T01 – NA 69 m

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Betrachtungen zur Untersuchungsvariante mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m wird in dieser Untersuchungsvariante der Einfluss eines weiter verkürzten Notausgangsabstands betrachtet. Da dessen Wirkung nur in einem iterativen Prozess festgestellt werden kann, wird in einem ersten Untersuchungsschritt der Notausgangsabstand von 138,5 m auf 69 m etwa halbiert. Abbildung 34 zeigt die Ergebnisse getrennt nach Leitstoffen sowie als Gesamtsummenhäufigkeitskurve für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 69 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %. Im Vergleich zum Nullfall zeigt sich die positive Wirkung der Verkürzung des Notausgangsabstands auf 69 m. Es zeigt sich aber auch, dass das Grenzkriterium weiterhin infolge des Leitstoffs Benzin mit der Freisetzungsmenge von 8 t sowie in der Überlagerung aller Leitstoffe überschritten wird. Um das Grenzkriterium einhalten zu können, werden weitere sicherheitserhöhende Maßnahmen notwendig.

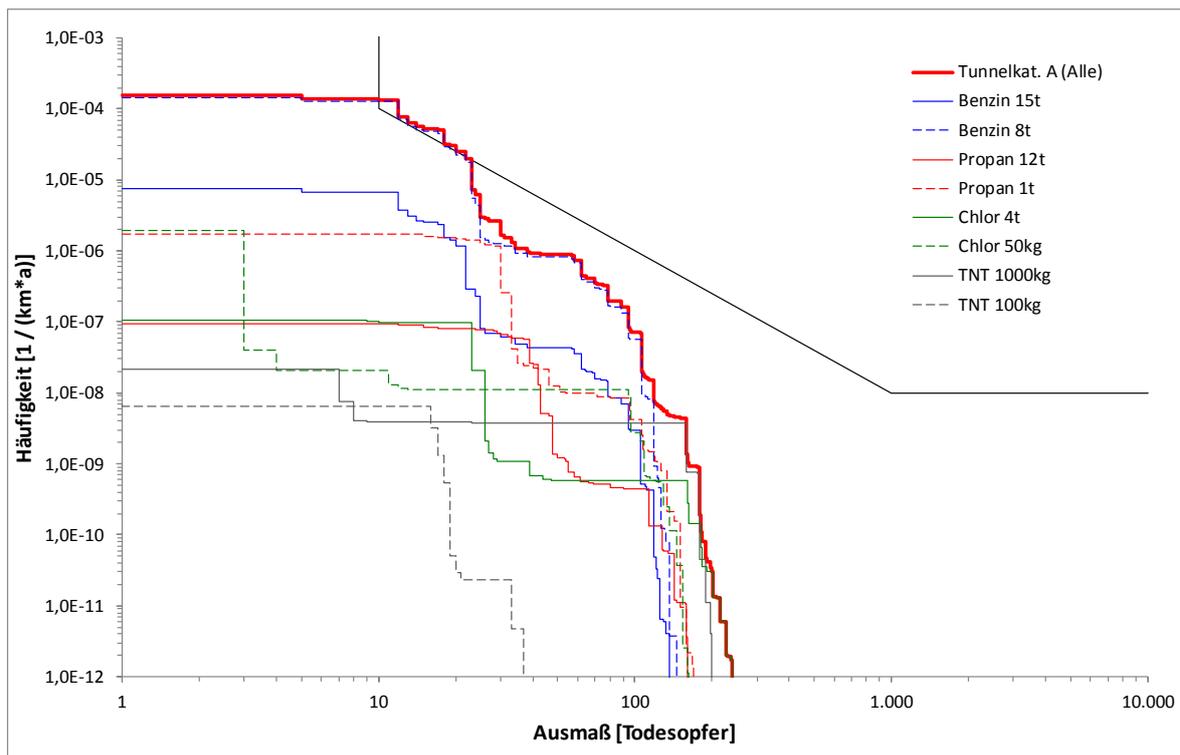


Abbildung 34: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 69 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %

4.6.3 Untersuchungsvariante 1-2: T01 – NA 54,0 m

In weiteren Untersuchungsschritten wird der Notausgangsabstand soweit verkürzt, bis die Gesamtsummenhäufigkeitskurve das Grenzkriterium nicht mehr überschreitet. Abbildung 35 zeigt, dass ab einem Notausgangsabstand von 54 m das Grenzkriterium eingehalten werden kann. Der Tunnel Leverkusen wäre unter diesen Randbedingungen für alle Leitstoffe freizugeben.

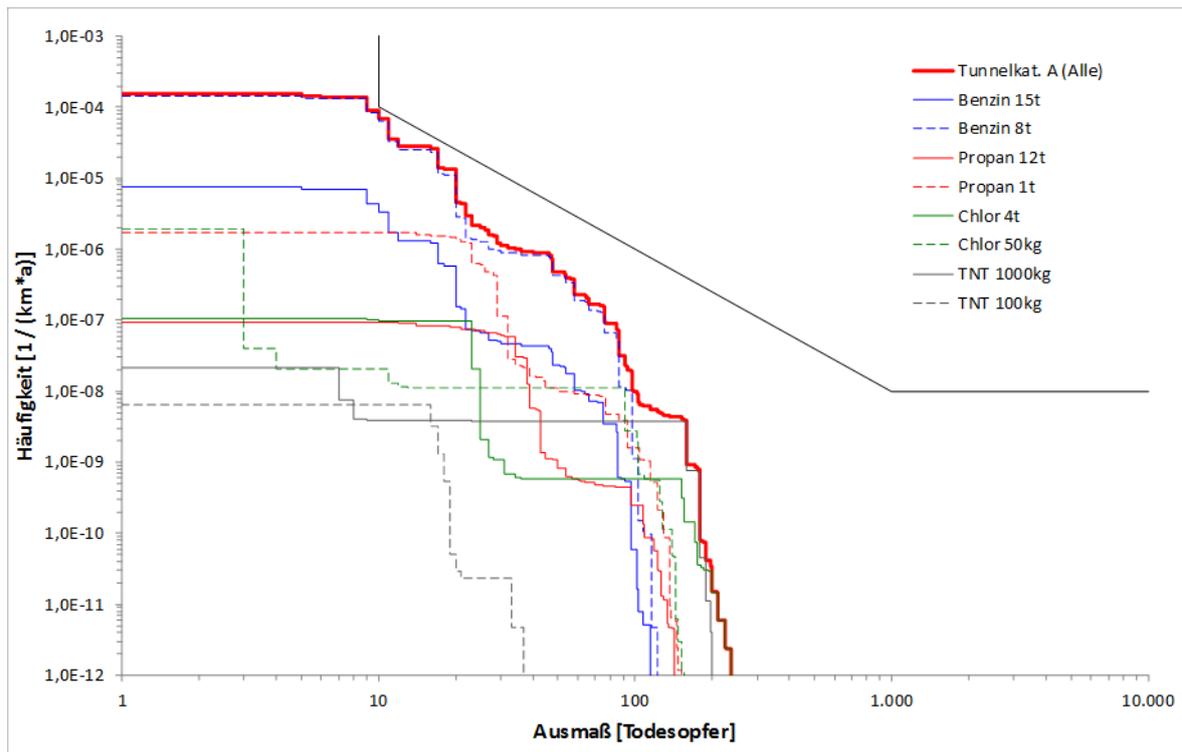


Abbildung 35: Summenkurven der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 54,0 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %

4.6.4 Untersuchungsvariante 2: T01 – Trennwand, NA 138,5 m

In einer weiteren Untersuchungsvariante wird der Einfluss einer über die gesamte Tunnellänge verlängerten Trennwand betrachtet, die zu zwei getrennten Röhren je Fahrtrichtung führt. Die Röhre der Hauptfahrbahn weist dann 4 Fahrstreifen auf und die Röhre der Rampenfahrbahn 2 Fahrstreifen. Als maßgebende Röhre zur Überprüfung der Zulässigkeit von Gefahrguttransporten wird im Folgenden die Röhre der Hauptfahrbahn mit 4 Fahrstreifen betrachtet. Des Weiteren wird sich bei dieser Analyse auf die Betrachtung des Leitstoffs Benzin beschränkt, der sich in den vorausgehenden Untersuchungen als maßgeblich erwiesen hat. In Abbildung 36 sind die Ergebnisse Untersuchungsvariante T01 mit durchgehender Trennwand für einen Notausgangsabstand von 138,5 m dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass das Grenzkriterium geringfügig, mehrmals überschritten wird. Bei der Ergebnisinterpretation ist jedoch zu beachten, dass bei Einbezug aller Leitstoffe die resultierende Gesamtsummenhäufigkeitslinie zu einer deutlicheren Überschreitung führen wird. Aus Abbildung 36 geht ferner hervor, dass das maximale Schadensausmaß bei dieser Variante ca. 180 Betroffene beträgt.

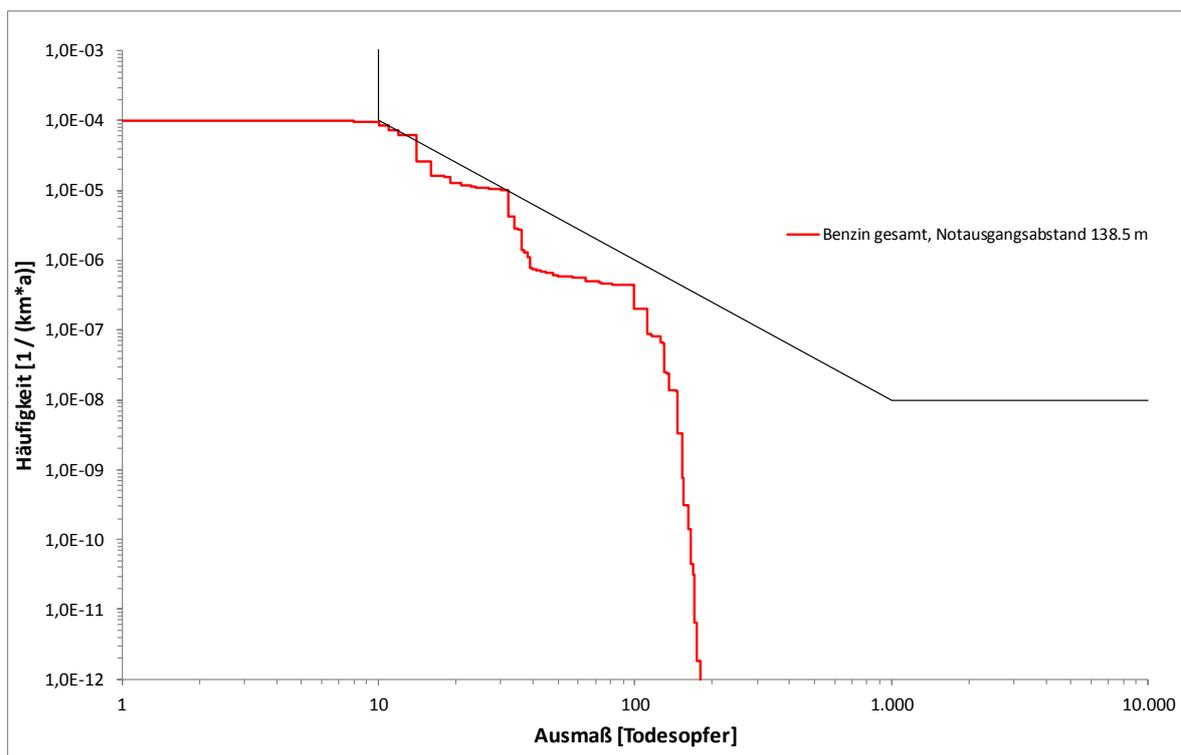


Abbildung 36: Summenkurve für den Leitstoff Benzin für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %

4.6.5 Untersuchungsvariante 3: T01 – Trennwand, NA 69 m

In einem weiteren Analyseschritt wird der Notausgangsabstand soweit reduziert, bis keine Überschreitung des Grenzkriteriums mehr zu verzeichnen ist. Aus Abbildung 37 wird ersichtlich,

dass ab einem Notausgangsabstand von 69 m keine Überschreitung mehr zu erwarten ist. Zu Überprüfen wäre jedoch, ob dies bei Einbezug sämtlicher Leitstoffe noch zutreffen ist. Aus Abbildung 37 geht ferner hervor, dass durch die Halbierung des Notausgangsabstands auf 69 m das max. Schadensausmaß auf 105 Betroffene reduziert werden kann und somit einen signifikanten, sicherheitserhöhenden Beitrag leistet.

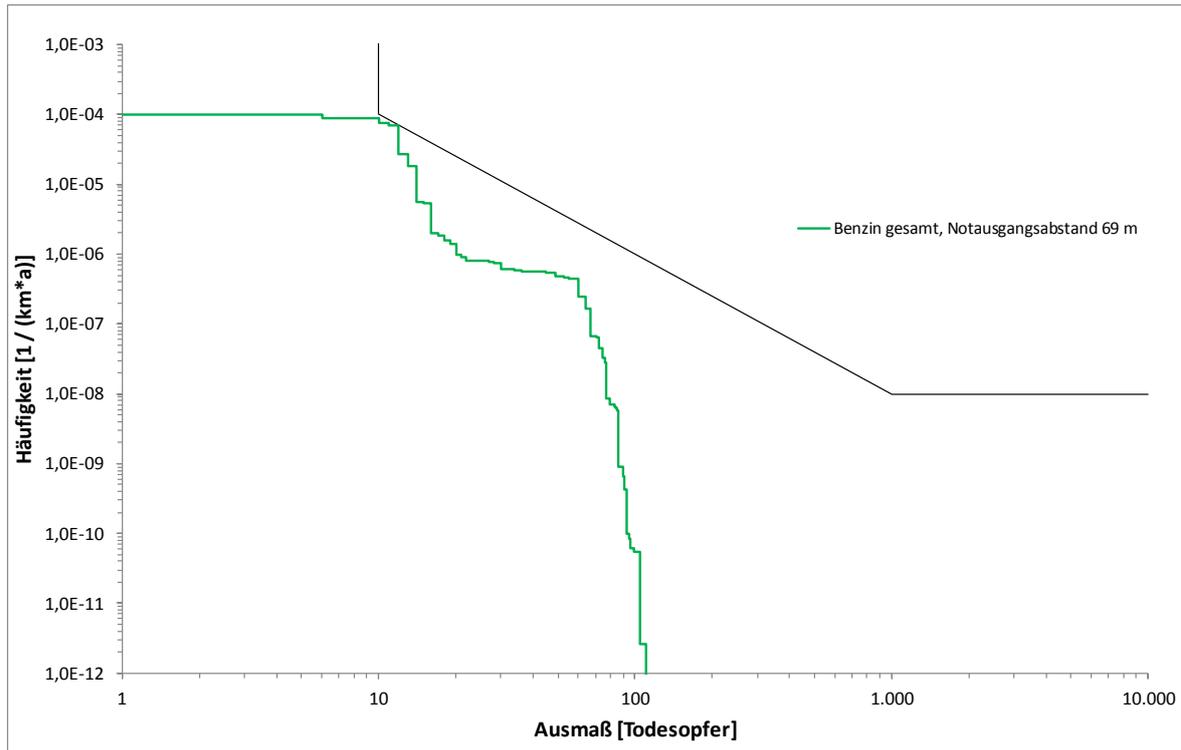


Abbildung 37: Summenkurve für den Leitstoff Benzin für die Untersuchungsvariante T01 mit einem Notausgangsabstand von 69 m und einem Gefahrgutanteil am Schwerverkehr von 6 %

4.7 Zusammenfassung Gefahrgutanalyse

Die nach dem Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gem. ADR 2007 durchgeführten Gefahrgutanalysen haben gezeigt, dass der Tunnel Leverkusen nach derzeitigem Planungsstand mit einem Notausgangsabstand von 138,5 m nicht für den Transport für Gefahrgüter freigegeben werden kann. Durch die Verkürzung des Notausgangsabstandes oder durch die Verlängerung der Trennwand zwischen der Hauptfahrbahn und der Rampenfahrbahn über die gesamte Röhrenlänge lassen sich signifikante Verbesserungen im Sicherheitsniveau erzielen. Im Fall der derzeitigen Planungsvariante kann der Tunnel Leverkusen für Gefahrgüter freigegeben werden, wenn ein Notausgangsabstand von 54 m realisiert wird. So kurze Notausgangsabstände lassen sich kostengünstig in der Tunnelinnenwand realisieren. Der sichere Bereich bildet dann die Nachbarröhre. Auch im Fall der verlängerten Trennwand wird eine Freigabe für Gefahrguttransporte möglich, wenn ein Notausgangsabstand von 69 m realisiert werden kann. Diese

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Gefahrgutanalyse für verbesserte / optimierte
Tunnelvarianten

Variante hat auch den Vorteil, dass Verflechtungsverkehre innerhalb des Tunnels vermieden werden und somit auch außerhalb der Gefahrgutbetrachtung ein deutlich höheres Sicherheitsniveau erzielt werden kann. Aus Sicherheitsüberlegungen wäre daher dieser Variante eindeutig der Vorzug zu geben.

5 Abschätzung der Kosten und Realisierbarkeit der vorteilhaften Untersuchungsvarianten

5.1 Untersuchungsvariante 1-2: T01 – NA 54m

Die Untersuchungsvariante 1-2 berücksichtigt die Machbarkeitsvariante T01 mit verkürzten Notausgangsabständen von 54 m zwischen den beiden Richtungstunneln. Durch die Tunnellänge von 970 m werden somit $(970 \text{ m}/54 \text{ m})-1 = 17$ Notausgänge erforderlich. Aufgrund des Bauablaufes werden bauzeitlich mindestens an der südlichen Tunnelröhre zusätzliche Fluchttreppenhäuser an die Oberfläche erforderlich (vorhanden 6). Für den Endzustand kann möglicherweise auf Fluchttreppenhäuser verzichtet werden. Auf der sicheren Seite die Kosten betreffend liegend, wird eine symmetrische Ausstattung des Tunnels mit Fluchttreppenhäusern im reduzierten Abstand auf beiden Seiten betrachtet.

Zusammengefasst entstehen bei dieser Variante Mehrkosten durch die zusätzlichen Notausgänge zwischen den Tunnelröhren, die Fluchttreppenhäuser für die Bauphase sowie der zugehörigen Nebenkosten (Grunderwerb, Entschädigungen etc.). Die Kosten für die Notausgänge in die Nachbarröhre sind erhöht angesetzt, da diese nachträglich durch die Außenwände sowie die temporäre Verbauwand geführt werden müssen, was zu erhöhten Abdichtungsaufwendungen gegenüber dem anstehenden Grundwasser führt (vgl. Tabelle 28):

- zusätzliche außenliegende Fluchttreppenhäuser: Nord und Süd je 11 Stk.
- Notausgänge in Nachbarröhre: 17 Stk.
(durch Schlitzwand, inkl. Abdichtungsmaßnahmen)
- Grunderwerb für zusätzliche Fluchttreppenhäuser je 20 m²

Leistungsbezeichnung	Einheit []	Einheitspreis [€/Einheit]	Menge [Einheit]	Differenzkosten [€]
Vorarbeiten/Vorleistungen				
zus. Grunderwerb, Inanspruchnahme und Entschädigungen (infolge zus. Nottreppenhäuser an beiden Röhren; (22x20)m ²)	m ²	150	440	66.000
Bauphase 1				
zus. Fluchttreppenhäuser Süd (a=54m; 7 Stk.)	m ³	500	2.730	1.365.000
Bauphase 2				
zus. Fluchttreppenhäuser Süd (a=54m; 2 Stk.)	m ³	500	1.560	780.000
Bauphase 6				
zus. Notausgänge in Nachbarröhre (17 Stk.)	Stk.	12.500	17	212.500
zus. Fluchttreppenhäuser Nord (a=54m; 11 Stk.)	m ³	500	4.290	2.145.000
SUMME				4.568.500

Tabelle 28: Kostendifferenz Variante 1-2 (T01 nach MB-Studie; Notausgangsabstand a~54 m)

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Abschätzung der Kosten und Realisierbarkeit der
vorteilhaften Untersuchungsvarianten

Die Mehrkosten betragen nach der durchgeführten Kostenschätzung etwa 4,5 Mio. € netto; zzgl. 19 % Mehrwertsteuer entspricht dies etwa 1,0 % der brutto Herstellkosten. Das Preisniveau der Machbarkeitsstudie wurde in den zu Grunde gelegten Einheitspreisen berücksichtigt.

Die Vergleichsuntersuchung Variante 1-2 berücksichtigt lediglich Notausgänge zwischen den Tunnelröhren. Durch die zusätzliche, beidseitige Anordnung von außenliegenden Fluchttreppenhäusern erhöht sich die Sicherheit noch weiter. Somit gibt es in diesem Fall einen Spielraum, um die Notausgänge in einem größeren Abstand anzuordnen. Die ermittelten zusätzlichen Herstellkosten liegen also auf der sicheren Seite.

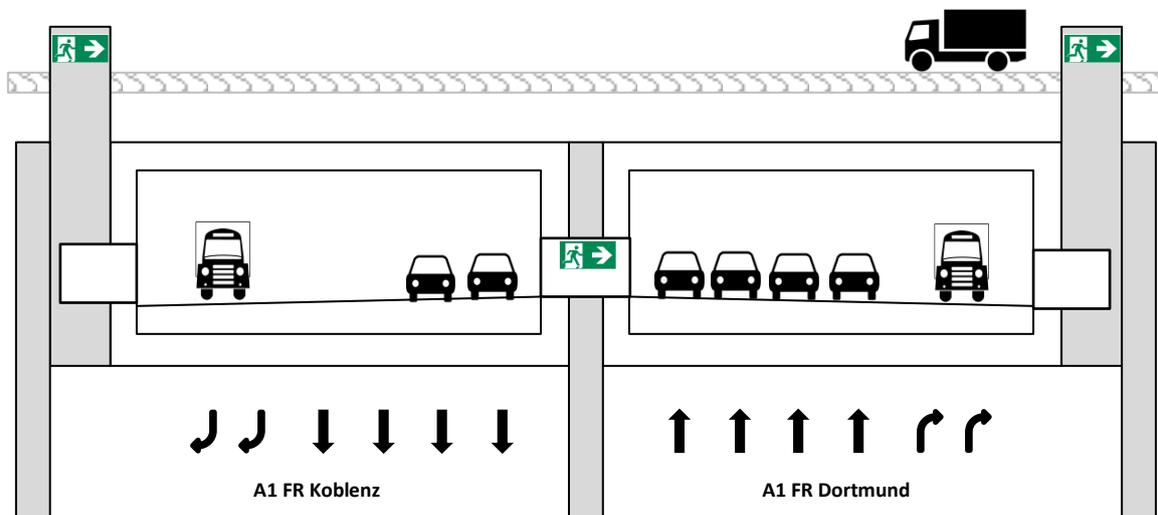


Abbildung 38: Vergleichsuntersuchung Variante 1-2 - Schematischer Querschnitt mit Notausgang zwischen den Tunnelröhren

5.2 Untersuchungsvariante 3: T01 – durchgehende Trennwand, NA 69m

Ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich der Machbarkeit dieser Variante besteht in dem verkehrlichen Nachweis, dass die verkürzten Strecken zwischen dem Kreuz Leverkusen West und dem westlichen Tunnelportal aus verkehrstechnischer Sicht möglich sind. Dieser Nachweis kann über eine Zuordnung in einen Verflechtungsbereichtyp nach RAA 2008, Tab.25 und anschließender Bewertung nach HBS 2015 erfolgen. Die A1 im Stadtgebiet Leverkusen kann der Entwurfsklasse EKA 1B zugeordnet werden, so dass bei einer mehr als zweistreifig durchgängigen Fahrbahn (A1), zweistreifigen Ein- und Ausfahrten (A3 und A59 bzw. umgekehrt) und einer Verflechtungslänge < 600 m der Verflechtungstyp V2 vorliegen würde (unter der Annahme, dass kein Randverkehr fehlt (Fall d)). Dies trifft für die südliche A1 FR Dortmund zu. Hier beträgt die Verflechtungstrecke nur noch knapp 540 m. (Für die nördliche A1 liegt gem. RAA kein Verflechtungsbereich vor.)

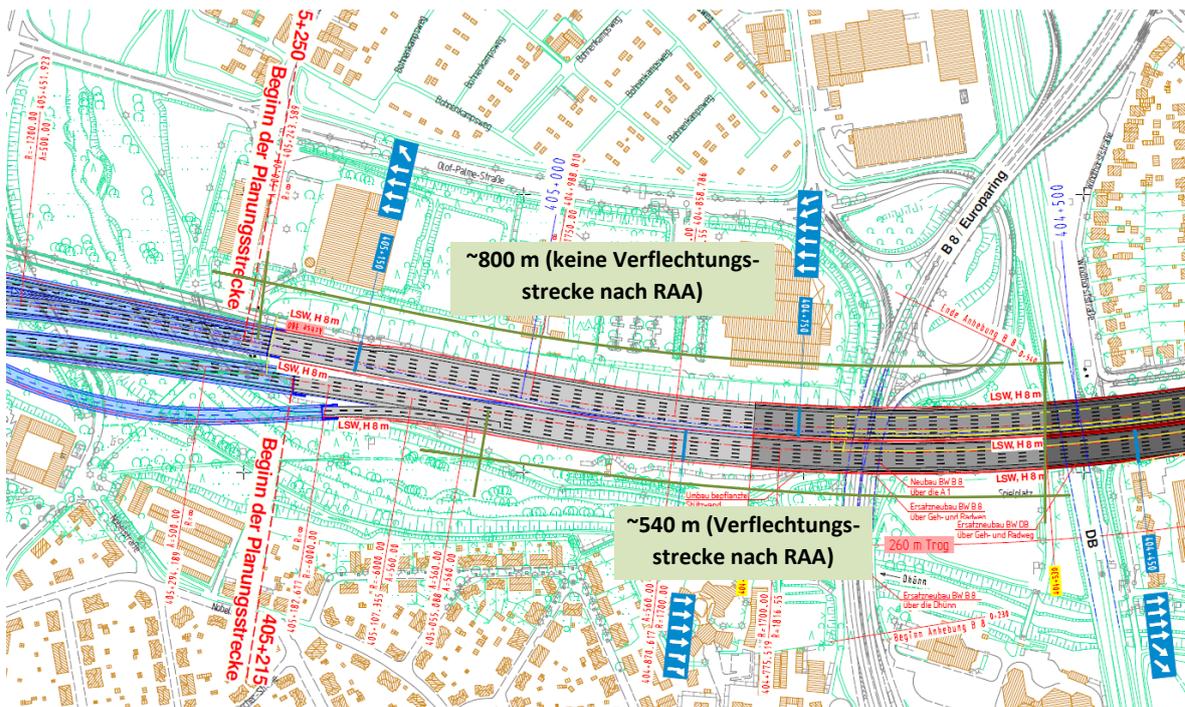


Abbildung 39: Streckenlängen zwischen AK Leverkusen West und Tunnelportal

Allerdings kann die Verkehrsqualität für einen Typ V2 nicht nach HBS 2015 bestimmt werden. Durch geringfügige Verlängerung des Verflechtungsbereiches auf > 600 m entstände allerdings wieder – wie auf der nördlichen Fahrbahn – die Abfolge einer Einfahrts-, freie Strecke- und Ausfahrtssituation, so dass dann ebenfalls wieder kein Verflechtungsbereich gem. RAA vorliegt und weitere Nachweise zur Verkehrsqualität mglw. entfallen können. Alternativ könnte der

Nachweis der Verkehrsqualität auch über eine Verkehrsflusssimulation durchgeführt werden¹⁸. Nach allen vorliegenden Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass durch eine geringfügige Anpassung der Planung eine solche Lösungsmöglichkeit realisierbar ist.

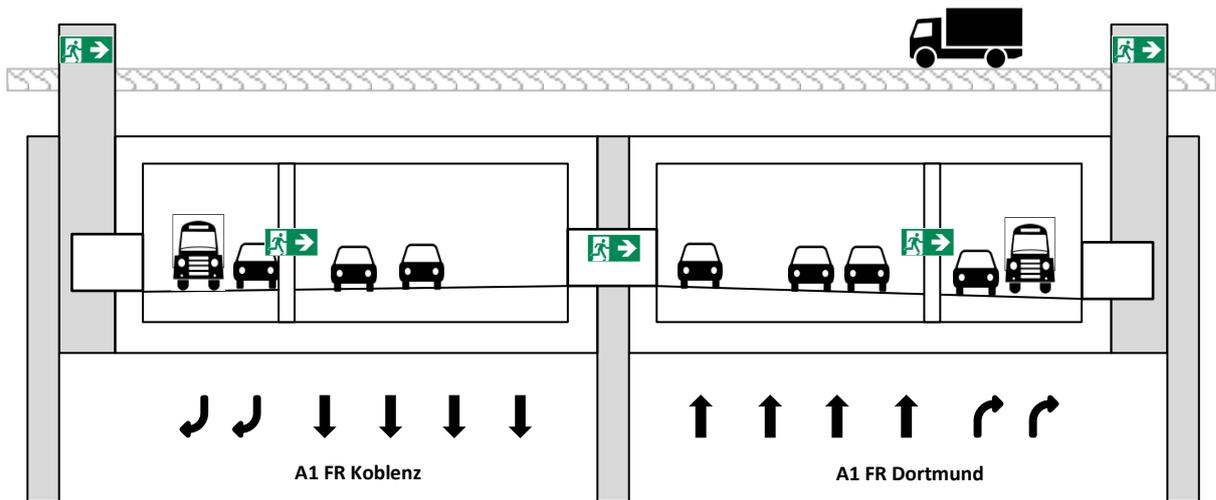


Abbildung 40: Vergleichsuntersuchung Variante 03 - Schematischer Querschnitt mit Trennwänden, Notausgängen zwischen den Tunnelröhren und an die Oberfläche

Die durchgängige Trennwand wird mit der Untersuchungsvariante 03 nachgewiesen. Dies führt bei Notausgangsabständen von 69 m zu $((970 \text{ m}/69)-1=)$ 13 erforderlichen Notausgängen. Durch die Verbreiterung würde bei unveränderter Trassierung der Variante T01 eine stärkere Kollision des Tunnels im Süden mit der „Kurt-Rieß-Halle“ und der „Grünwald-Halle“ (Abbildung 41, blaue Kästen) entstehen. Bei einem Versatz nach Norden entstehen möglicherweise Mehraufwendungen beim Neubau „B8-Querung“ (Abbildung 41, grüner Kasten) sowie in der Bauphase 1 zur Sicherung der Stelzenfundamente und aufgrund eingeschränkter Arbeitshöhen zur Herstellung der stelzenseitigen Verbauwand (siehe Abbildung 42).

¹⁸ vgl. HBS 2015, Seite A4-9

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Abschätzung der Kosten und Realisierbarkeit der
vorteilhaften Untersuchungsvarianten

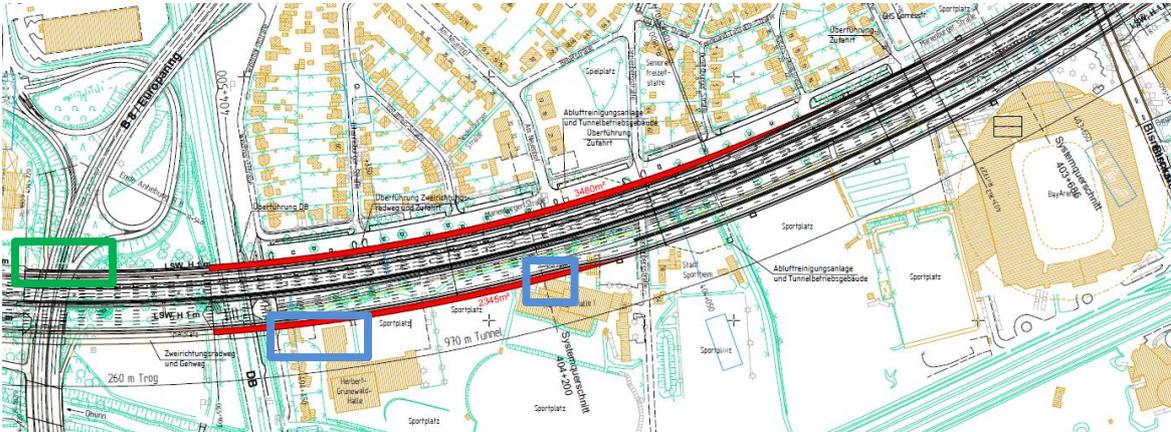


Abbildung 41: Variante 3 - Zusätzliche Flächeninanspruchnahme und Kollisionen

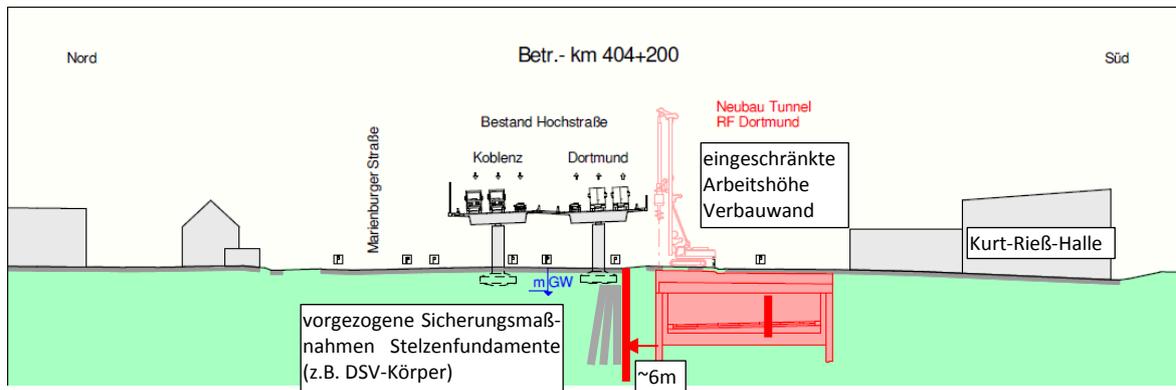


Abbildung 42: Variante 3 – baubetriebliche und konstruktive Folgen unter Beibehaltung Lage südliche Außenwand

Bei dieser Variante entstehen einerseits durch den 6 m breiteren Querschnitt höhere Grunderwerbs- und Entschädigungskosten, Zusatzkosten für die verlängerten Trennwände (Nord ~730 m und Süd ~430 m) sowie für die Tunnelausstattung durch die zweigeteilten Querschnitte je Röhre. Auf der anderen Seite wirkt sich das günstigere Tragverhalten des geteilten Querschnitts positiv auf die Kosten aus. Die Reduzierung der lichten Weite von 24,0 m auf (18,0+11,0) m führt zu erheblich reduzierten Bewehrungsgehalten in Decke und Sohle. Außerdem könnten die außenliegenden Fluchttreppenhäuser vollständig entfallen, da zur bauzeitlichen Sicherheitsbetrachtung der neue, getrennte Teil einen eigenen Sicherheitsbereich darstellt. Weitere Einsparungsmöglichkeiten lägen ggf. vor, wenn der 6-streifige Querschnitt nur durch eine Spannbetonkonstruktion realisierbar wäre, was den vorliegenden Untersuchungen jedoch nicht entnommen werden kann.

Der Aspekt des günstigeren Tragwerks wurde in der vorliegenden Kostenbetrachtung von Straßen.NRW nicht berücksichtigt. Beide Tunnelquerschnitte (6 bzw. 4+2) wurden pauschal mit einem Einheitspreis von 3.360,-€/m² angesetzt. Darin enthalten sind sämtliche Kosten die in direktem Zusammenhang mit der Erstellung des Tunnels stehen, wie die Erdarbeits-, die Verbau-

als auch die endgültigen Rohbaukosten. Dies erscheint auf den ersten Blick eine zu grobe Pauschalisierung für einen möglichen validen Variantenvergleich zu sein.

In Tabelle 29 sind die Zusatzkosten hinsichtlich der Maßnahme mit durchgehender Trennwand aufgeführt. Einsparungspotentiale bzgl. des günstigeren Tragwerks wurden für die Erweiterungsbereiche berücksichtigt. Es ist zu entnehmen, dass die Zusatzkosten mit etwa 23 Mio € höher als bei der Variante 1-2 ausfallen. Diese Erhöhung begründet sich im Wesentlichen in den noch sehr grob angenommenen Kosten nach m² für die Erstellung des Tunnelbauwerks. Die erwarteten Mehrkosten belaufen sich auf etwa 5% der Bruttokosten der Variante T01.

Die Untersuchungen erfordern für den Endzustand keine außenliegenden Fluchttreppenhäuser. Durch die vorhandene Trennwand bereits zum Betrieb im Bauzustand (ab Bauphase 3), könnte hier eventuell vollständig auf die Fluchttreppenhäuser verzichtet werden. Bei Verzicht auf diese Bauwerke könnten zusätzlich etwa 5 Mio € netto eingespart werden (2x13x500€/m³x390m³), was ca. 1% der Herstellkosten entspricht. Alternativ könnten die Treppenhäuser unter Berücksichtigung eines höheren Sicherheitsniveaus zu einer Vergrößerung der Notausgangsabstände genutzt werden.

Leistungsbezeichnung	Einheit []	Einheitspreis [€/Einheit]	Menge []	Gesamtkosten [€]
Vorarbeiten/Vorleistungen				
zus. Grunderwerb, Inanspruchnahme und Entschädigungen (infolge Verbreiterung verlängerter Mittelwand in beiden Röhren; (6x(430+730))m ²)	m ²	150	6.960	1.044.000
Bauphase 1				
Mehraufwand breiterer Tunnel Südröhre (6mx430m)	m ²	3.360	2.580	8.668.800
zus. Fluchttreppenhäuser Süd (a=69m; 5 Stk.)	m ³	500	1.950	975.000
zus. Notausgänge in Mittelwand Süd (a=69m; 7 Stk.)	Stk.	6.500	7	45.500
Einsparungen Tragwerk Tunnel Süd, südlicher Teil (durch 2-Feld-Rahmen in Decke und Sohle)	m ²	350	-8.708	-3.047.625
zus. Tunnelausstattung inf. Trennung Südröhre (~30%)	psch	1.500.000	1	1.500.000
Bauphase 2				
zus. Fluchttreppenhäuser Süd (a=69m; 2 Stk.)	m ³	500	780	390.000
Bauphase 6				
zus. Notausgänge in Nachbarröhre	Stk.	12.500	13	162.500
Mehraufwand breiterer Tunnel Nordröhre (6mx730m)	m ³	3.360	4.380	14.716.800
zus. Fluchttreppenhäuser Nord (a=69m; 7 Stk.)	m ³	500	2.730	1.365.000
Einsparungen Tragwerk Tunnel Nord, südlicher Teil (durch 2-Feld-Rahmen in Decke und Sohle)	m ²	350	-14.783	-5.173.875
zus. Tunnelausstattung inf. Mittelwand (~50%)	psch	2.500.000	1	2.500.000
SUMME				23.146.100

Tabelle 29: Kostendifferenz Variante 3 (durchgezogene Mittelwand; Notausgangsabstand a~69 m)

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Abschätzung der Kosten und Realisierbarkeit der
vorteilhaften Untersuchungsvarianten

In Anbetracht der baulich-konstruktiven Einschränkung der Ausgangsvariante T01 mit durchlaufender Trennwand wird der generell nach Norden verlagerte Bauablauf der Variante T02 (siehe Abbildung 43) wieder interessant. Dieser Bauablauf wurde in der Synopse allerdings vorlaufend verworfen.

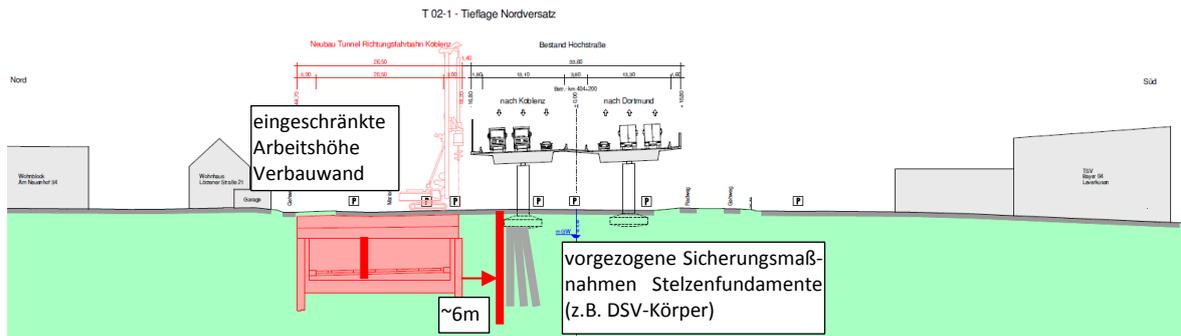


Abbildung 43: Variante 03 mit Nordversatz (T02) - baubetriebliche und konstruktive Folgen

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, unter welchen Voraussetzungen ein Tunnel im Bereich der heutigen „Stelze“ in Leverkusen für den Transport von Gefahrgütern freigegeben werden kann.

Grundlage hierfür bildete eine vertiefte Analyse nach Stufe 2a des Verfahrens zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR. Die durch den Transport von Gefahrgütern entstehenden Risiken konnten über die Verknüpfung der Eintrittshäufigkeit eines Gefahrgutereignisses mit den zu erwartenden Schadensausmaßen quantifiziert werden. Die hierzu erforderlichen Berechnungen erfolgten stellvertretend für alle Gefahrstoffe mittels der Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und TNT. Die jeweiligen Eintrittshäufigkeiten wurden unter Berücksichtigung der den Ereignisablauf maßgeblich beeinflussenden Faktoren mit Hilfe von Ereignisbäumen bestimmt. Hierbei wurde auf eine möglichst transparente Darstellung aller Größen und Berechnungsvorgänge geachtet. Zur Ermittlung des jeweiligen Schadensausmaßes wurden umfangreiche numerische Berechnungen mit unterschiedlichen Simulationsprogrammen durchgeführt. Dadurch konnten unter Berücksichtigung der betriebs- und sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Lüftung, Detektion und der Abstände der Notausgänge sowie dem Verkehrszustand räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Ausmaße ermittelt werden. Die Ermittlung der Risiken hat ergeben, dass durch eine Verkürzung des Notausgangsabstandes bzw. durch die Unterteilung der Tunnelröhren mit einer Trennwand in zwei Tunnelröhren eine signifikante Verbesserung im Sicherheitsniveau erzielt werden kann.

Dadurch konnte gezeigt werden, dass die derzeit geplante Tunnelvariante mit 6 Fahrstreifen je Röhre im Bereich der Tunnelinnenstrecke bei einem Notausgangsabstand von 54 m für den Transport von Gefahrgütern freigegeben werden kann. Für den Fall der Unterteilung der Tunnelröhren mittels einer durchgehenden Trennwand konnte nachgewiesen werden, dass in Kombination mit einem Notausgangsabstand von 69 m der Tunnel Leverkusen ebenfalls für Gefahrguttransporte freigegeben werden kann.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen wurde für die konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen „Verringerung der Notausgangsabstände“ und „durchgehende Trennwand“ die bauliche Realisierung untersucht. In einer weiterführenden Zusatzkostenbetrachtung wurde deutlich, dass die resultierenden Mehrkosten in Abhängigkeit der jeweiligen Verbesserungsmaßnahme zwischen etwa 1 % bis 5 % der Bruttoherstellkosten liegen. Allerdings wurden in den Kostenbetrachtungen weiterhin außenliegende Fluchttreppenhäuser angenommen, die für den Endzustand nicht erforderlich sind und somit entweder zu einer Verringerung der Herstellkosten oder zu einem alternativen Sicherheitskonzept (Vergrößerung der Notausgangsabstände) herangezogen werden könnten.

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die sich als vorteilhaft erwiesenen Untersuchungsvarianten grundsätzlich realisierbar sind. In Kombination mit weiteren aufgezeigten Verbesserungsmaßnahmen sollte die grundsätzliche Konzeption im Zuge der weiteren Planung weiter angepasst werden.

Literaturverzeichnis

ADR (2013)	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR 2013), BGBl II / 2013
Amun (1997)	Amundsen, F; Ranes, G. (1998): Traffic Accidents and Carfires in Norwegian Tunnels, Safety in Road and Rail Tunnels. Third International Conference France
Baltzer et al. (2009)	Baltzer, W., Imhof, D., Mayer, G., Riepe, W., Zimmermann, U., Zulauf, Ch. (2009), Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
Baltzer et al. (2004)	Baltzer, W.; M. Barleon, Th. Becher, G. Mayer, W. Riepe, B. Steinauer und U. Zimmermann (2004): Ausgestaltung von Brand-Notbeleuchtung und Leitsystemen zur Fluchtwegkennzeichnung in Straßentunneln – Systematik der Leitsysteme, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 892, BMVBW
FE 03.378/2004/FRB	Baltzer, W., Kündig, P., Locher, P., Mayer, G., Riepe, W., Steinauer, B., Zimmermann, U., Zulauf, C. (2005-2007): Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
DIN EN 15643-x	DIN EN 15346: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität Teil 3: Rahmenbedingungen für die Bewertung der sozialen Qualität, Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität
FE 03.375/2004/FGB	Mayer, G., Kündig, P., Steinauer, B. (2006): Brandversuche in Tunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
FE 03.390/2005/FGB	Baltzer, W., Mayer, G., Mühlberger, A., Pauli, P., Riepe, W. Steinauer, B., Zimmermann, U. (2006): Gestaltung von Notausgängen in Straßentunneln, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
GGVSEB (2013)	Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahnen und Binnengewässer -

- GGVSEB, BGBl I/2013 Nr. 4 vom 06.02.2013
- HBI HBI Anlage T13.2 - Kategorisierung von Gefahrguttransporten nach ADR 2007 in Stufe 2a
- Klein, Scholl (2011) Klein, R., Scholl, A. (2011), Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse, Verlag Franz Vahlen, München
- Mielecke et al. (2016) Mielecke, T., Graubner, C.-A., Hess, R., Pola, V., Caspari, W. (2016), Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Mayer (2008) Mayer, G. (2008): Bestimmung der Verkehrssicherheit von Straßentunneln mittels quantitativer Risikoanalysen, VDI Berichte 2019: Tunnel und andere unterirdische Verkehrsanlagen, Technische Ausstattung, Betrieb und Sicherheit, ISBN 978-3-18-092019-1
- Mayer, Steinauer (2007) Mayer, G., B. Steinauer (2007): Tunnel fires: Assessment of the tunnel users' escape possibilities using numerical simulations of the smoke propagation, Transportation Research Board Meeting, 21.-25.1.2007, Washington, D.C
- Mayer (2006) Mayer, G. (2006): "Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation", Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47
- Mayer, Baltzer (2003) Mayer, G., Baltzer W. (2003): Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, Forschung + Praxis, Bd. 40, Bauverlag BV
- Mayer, Haastert (2003) Mayer, G., Haastert J. (2003): Quantifizierung und Bewertung von Risiken in Straßentunneln, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 43
- MTFVTP (1995) Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, im Auftrag des Massachusetts Highway Department und der Federal Highway Administration, Bechtel / Parsons Brinckerhoff, 1995
- Purser (1995) Purser, D.A. (1995): Toxicity Assessment of Combustion Products, in: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, Section 2, Chapter 8

Machbarkeitsstudie Gefahrguttransporte Tunnel A1
Leverkusen

Literaturverzeichnis

- RABT (2016) FGSV Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.) (2016): Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
- Richtlinie 2004/54/EG Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz
- Steinauer et al. (2005) Steinauer, B.; G. Mayer, M. Brake, A. Haack, J. Schreyer und M. Grünewald (2005): Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 925, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn