

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Maßnahmen und taktische
Vorgehensweise bei der
Brandbekämpfung in Straßentunneln
unter besonderer Berücksichtigung
von Gefahrstoffen

1 63

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder
Arbeitskreis V
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 163

Maßnahmen und taktische Vorgehensweise
bei der Brandbekämpfung in Straßentunneln
unter besonderer Berücksichtigung von Gefahrstoffen

von

Prof. Dr. Elke Jahn

Dr. Horst Starke

Dipl. Chem. Ursula Seliger

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

November 2013

BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes: 163	Titel des Berichtes Maßnahmen und taktische Vorgehensweise bei der Brandbekämpfung in Straßentunneln unter besonderer Berücksichtigung von Gefahrstoffen	ISSN: 0170-0060	
Autoren: Prof. Dr. Elke Jahn, Dr. Horst Starke, Dipl. Chem. Ursula Seliger		durchführende Institution: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Dr. Horst Starke	
Nummer des Auftrages: 54(4/2006)H		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Datum des Berichtes: November 2013			
Seitenzahl: 88	Bilder: 22	Tabellen: 13	Literaturverweise: 50
<p>Kurzfassung:</p> <p>In der vorliegenden Arbeit werden Charakteristika von Bränden betrachtet, in die große Brandlasten oder Gefahrgüter involviert sind. Dieses betrifft die Parameter Wärmefreisetzungsrate, Gastemperaturen und Feuerübersprung. Weiterhin wird ein Modell veranschaulicht, das einerseits auf der Grundlage bisheriger Tunnelbrände eine Klassifizierung dieser Brände beinhaltet und davon abgeleitet verschiedene Brandszenarien für Einsatzstrategien der Feuerwehr vorschlägt. Andererseits diskutiert dieses Modell die Gruppierung von Straßentunneln in Abhängigkeit unterschiedlicher Gefährdungspotentiale wie Gefahrgutauftreten, Tendenz zur Staubbildung, Zeit zwischen Brandentstehung und Eingreifen der Feuerwehr. Das Modell korreliert die Gruppierung der Straßentunnel mit den Brandszenarien.</p> <p>Im Abschnitt 2 der Arbeit wird untersucht, wie sich die Wirkungen von Gefahrgütern, die die Durchfahrtbeschränkung entsprechend ADR für bestimmte Tunnelkategorien begründen, in den Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr der jeweiligen Gefahrgüter abbilden. Die Gefahrennummern stellen bei einem Gefahrunfall eine wichtige Informationsquelle für die Feuerwehr dar. Diese Analyse soll weiterhin die Risiken aufzeigen, die für die Tunnelkategorien gegeben sind, für die die entsprechende Durchfahrtbeschränkung laut ADR nicht gilt.</p>			
Schlagwörter: Brandbekämpfung, Straßentunnel, Gefahrgut, ADR			

INHALTVERZEICHNIS

TEIL I

1	Einleitung	1
2	Präsentation von Tunnelbrandversuchen mit großen Brandlasten	2
2.1	Wärmefreisetzungsraten, Gastemperaturen und Feuerübersprung bei großen Tunnelbränden	2
2.2	Risikobetrachtungen für Straßentunnel bei Transporten mit großen Brandlasten oder Gefahrgütern	10
2.3	Wirksamkeit der Rauchabsaugung bei Tunnelbränden	12
3	Mobile Brandbekämpfung von Tunnelbränden	16
3.1	Taktische Vorgehensweise und Ausrüstung der Feuerwehr bei Tunnelbränden	16
3.2	Klassifizierung von Bränden in Straßentunneln für Feuerwehreinsätze	19
3.3	Einteilung von Straßentunneln als Grundlage für Feuerwehreinsätze	25
3.4	Schlussfolgerungen für die mobile Bekämpfung von Tunnelbränden	28

TEIL II

4	Einleitung	30
5	Grundlagen	31
5.1	Kriterien der Tunnelkategorisierung	31
5.2	Der Tunnelbeschränkungscode	34
5.3	Die Gefahrstoffklassen im ADR und die Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr mit Erläuterungen	37
5.4	Der Gefahrendiamant	37
5.5	Informationen zur Gesamtmenge an transportierten Gefahrgütern in Deutschland	37
5.6	Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr	40
6	Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr	42
6.1	Methodisches Vorgehen	42
6.2	Zuordnung der Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr zu den Tunnelbeschränkungs-codes	43
6.3	Schlussfolgerungen für Gefahrguttransport in Tunneln	53

LITERATUR

ANLAGEN

TEIL I

1 EINLEITUNG

Die Intensität eines Fahrzeugbrandes ist abhängig vom Fahrzeugtyp und insbesondere von der Ladung. Der Einfluss der Ladung wird insbesondere dann signifikant, wenn sie Gefahrgüter beinhaltet. Entwickelt sich ein Fahrzeugbrand in einem Tunnel, können weitere Parameter über den Brandverlauf entscheiden. Einerseits können auch in Tunneln viele Brände auf Grund der geringen Brandlasten vergleichsweise schnell gelöscht werden. Andererseits zeigen die Brandkatastrophen im Mont Blanc-, Tauern- und St. Gotthard-Tunnel jedoch, dass das Zusammentreffen von großen Brandlasten mit anderen kritischen Faktoren, wie zum Beispiel eine nicht optimale Steuerung der Tunnellüftung, verheerende Folgen haben kann.

In der vorliegenden Arbeit werden Charakteristika von Bränden betrachtet, in die große Brandlasten oder Gefahrgüter involviert sind. Daraus werden grundlegende taktische Hinweise für die Einsatzkräfte der Feuerwehr abgeleitet.

2 PRÄSENTATION VON TUNNELBRANDVERSUCHEN MIT GROßEN BRANDLASTEN

Im Bericht wird wiederholt auf reale Brandereignisse Bezug genommen. Aus diesem Grund sind in den Anlagen die Brände im

- Mont Blanc-Tunnel 1999
- Tauern-Tunnel 1999 und
- St. Gotthard-Tunnel 2001

beschrieben. Diese Ereignisse wurden ausgewählt, weil aus dem Brandverlauf und aus dem taktischen Vorgehen Schlussfolgerungen gezogen werden können, die für die Weiterentwicklung von Einsatzmaßnahmen der Feuerwehr bei ähnlich gelagerten Ereignissen herangezogen werden können.

2.1 Wärmefreisetzungsraten, Gastemperaturen und Feuerübersprung bei großen Tunnelbränden

Wenn ein Brand auf das Fahrzeug begrenzt werden kann, das den Brand verursachte, wird die Intensität des Brandes derartig limitiert, dass die Maßnahmen der Einsatzkräfte der Feuerwehr sich nicht unterscheiden vom Vorgehen bei Bränden außerhalb von Tunneln. Die gleiche Meinung wird von Stampfli [STAMPFLI 2011] und Thon zum Ausdruck gebracht [THON 2011]. Wenn eine frühzeitige Detektion am Fahrzeug erfolgt und somit die Möglichkeit eines sofortigen Eingreifens bei der Brandbekämpfung von Tunnelnutzern besteht sowie ein langsamer Brandablauf, wie z. B. bei einem PKW, stattfindet, kann ein Brand sogar ohne Feuerwehr unter Nutzung der Löscheinrichtungen in Tunneln gelöscht werden. Eine Studie zeigt, dass rund 40 % aller Brände in Tunneln in Frankreich auf diese Weise gelöscht werden [STUVA 2000].

Ein insgesamt überproportionaler Anteil von LKW an Brandereignissen in Tunneln wird von Bandmann am Beispiel des Elbtunnels in Hamburg beschrieben [BANDMANN 2003]. Der Elbtunnel gilt als der meist befahrene Straßentunnel in Deutschland und zählt zu den höchst frequentierten Tunneln in Europa. Für die Jahre 1990 bis 1999 war im Durchschnitt nahezu monatlich ein Brandereignis innerhalb des Tunnels zu verzeichnen. Besonders auffällig ist der mit fast 25 % überproportionale Anteil der LKW an den Brandereignissen, deren Anteil am Verkehrsaufkommen insgesamt aber lediglich bei etwa 15 % liegt. Die Statistik des Elbtunnels verweist damit darauf, dass nicht nur auf Grund der erheblich höheren Brandlast, sondern auch auf Grund der im Verhältnis zum Verkehrsanteil überproportionalen Ereignis-

häufigkeit eine wesentlich größere Gefahr vom LKW-Verkehr ausgeht, verglichen mit dem PKW-Verkehr.

Zur Beschreibung der Dimension eines Brandes wird vorrangig die Wärmefreisetzungsrate (englisch: heat release rate HRR) verwendet, z.B. [INGASON 2004]. Für PKW werden für die Wärmefreisetzungsrate Werte in einem Bereich zwischen 1,5 und 8 MW ermittelt, wobei jedoch für die überwiegende Anzahl der PKW-Typen Werte unter 5 MW gefunden werden. Wenn am Brand zwei PKW beteiligt sind, steigen die HRR-Werte auf 3,5 bis 10 MW. Ingason und Lönnermark leiten aus den experimentellen Werten einen linearen Zusammenhang zwischen der Wärmefreisetzungsrate und dem Brennwert der PKW's ab. Es ist ein durchschnittliches Anwachsen von 0,7 MW pro GJ zu verzeichnen. Diese Beobachtung ist wesentlich, da eine französische Studie zeigte, dass der Brennwert der PKW in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen ist. Experimentell gefunden werden auch große Unterschiede bei der Zeit, die für das Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate verstreicht: Sie variiert zwischen 10 und 55 Minuten.

Ingason schätzte auf der Grundlage der dazu vorhandenen Informationen die Wärmefreisetzungsraten von verschiedenen großen Tunnelbränden in Europa ein [INGASON 2003]. Analoge Betrachtungen liegen von Bettelini vor [BETTELINI 2003]. Für die geschätzten Wärmefreisetzungsraten geben beide einen Bereich von 100 bis 400 MW an, wobei an allen in Betracht gezogenen Bränden mindestens zehn LKW beteiligt waren.

Ein Wert von 20 MW für die Wärmefreisetzungsrate eines LKW galt lange Zeit als repräsentativ und wurde auch in verschiedenen Richtlinien als Bewertungsgrundlage angewendet [PIARC 1999], [NFPA 2001], [LACROIX 2001]. Diese Angabe scheint aber zu niedrig bemessen bei Beachtung der Tatsache, dass bei den großen Tunnelbränden der vergangenen Jahre wesentlich höhere Wärmefreisetzungsraten auch für die LKW auftraten, deren Ladung nicht als Gefahrgut entsprechend der in Deutschland gültigen Gefahrgutverordnung für Tunneltransporte einzustufen ist.

Auf der Grundlage dieser Erfahrungen wurde im Jahr 2003 eine Versuchsreihe mit dem Ziel initiiert, die Wärmefreisetzungsrate von Lastkraftwagen mit unterschiedlicher Fracht zu bestimmen [INGASON 2005], [LÖNNERMARK 2005], [LÖNNERMARK 2006]. Die Experimente wurden in einem - außer Funktion gesetzten – asphaltierten Tunnel der Länge 1600 m in Runehamar (Norwegen) durchgeführt. Der Tunnel war 6 m breit und 9 m hoch, wies eine Längsneigung zwischen 1 bis 3 % auf und hatte eine gering ausgeprägte Kurve. Eine Längslüftung in der Tunnelröhre wurde mit Hilfe eines mobilen Ventilators erzeugt. Die Strömungsgeschwindigkeit betrug mehr als 3 m/s vor Beginn der Brandversuche. Das Brandgut befand sich 560 m entfernt vom Portal auf der Abströmseite und 1040m entfernt vom Portal auf der Anströmseite (Abbildung 2.1). Die Gastemperaturen wurden an

verschiedenen Positionen entlang des Tunnels gemessen, von 100 m in Anströmrichtung des Brandes (bezeichnet mit -100 m) und 458 m in Abströmrichtung (bezeichnet mit +458 m). Die Messpunkte befanden sich 0,3 m unter der Tunneldecke. Der Versuchskomplex umfasste vier Versuche mit jeweils unterschiedlichen Materialien als Fracht. Das Versuchsprogramm wird in der Tabelle 1 veranschaulicht.

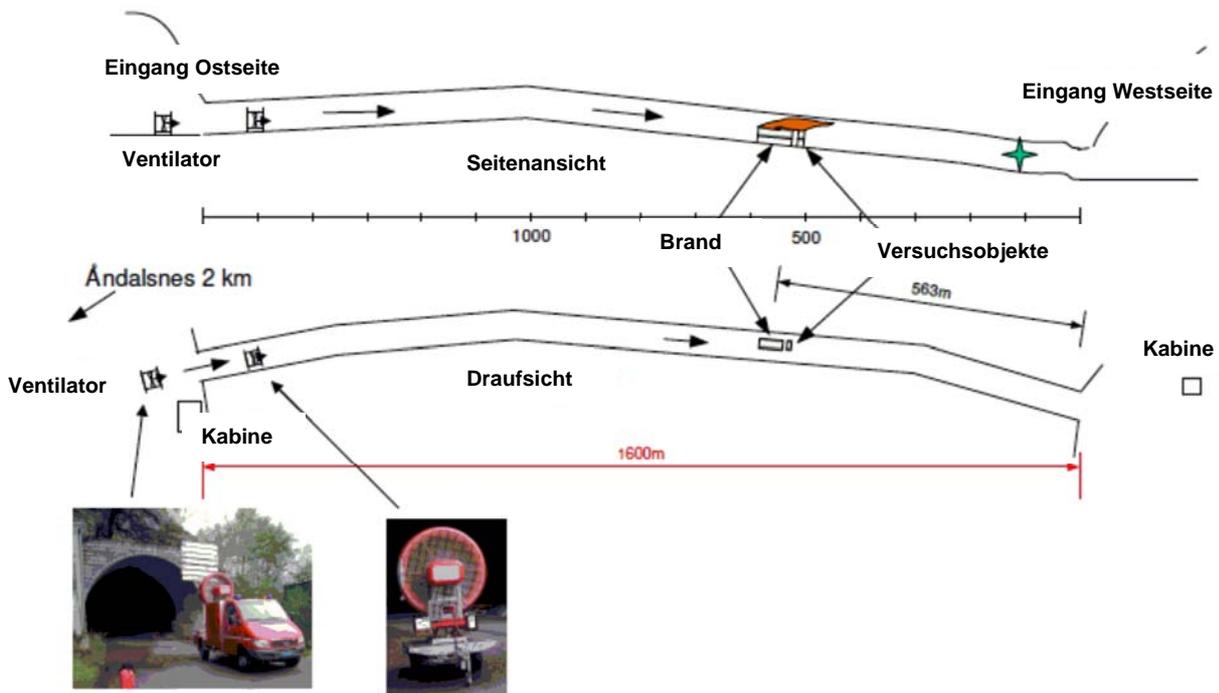


Abbildung 2.1: Tunnel in Runehamar mit Versuchsaufbau [INGASON 2005], [LÖNNERMARK 2005]

Holzpaletten und Polyurethanmatten



6,9 Tonnen

Abbildung 2.2: Beschreibung des Versuchsaufbaus in der Runehamar-Versuchsreihe [INGASON 2005], [LÖNNERMARK 2005]

Tabelle 2.1: Programm der Runehamar-Versuchsreihe [INGASON 2005], [LÖNNERMARK 2005]

Versuchsnummer	Brenngut	Masse Brenngut (kg)	Gesamtenergieinhalt (GJ)
T1	Paletten aus Holz und Polyethylen	10.160	247
T2	Holzpaletten und Polyurethanmatten	6.390	135
T3	Möbel und Autoreifen	7.530	179
T4	Polystyrolbecher in Pappkartons auf Holzpaletten	2.850	62

In der Tabelle 2.2 sind die Versuchsparameter und die ermittelten Wärmefreisetzungsraten zusammengefasst und die Abbildung 2.3 veranschaulicht die Wärmefreisetzungsraten der vier Tests in Abhängigkeit von der Zeit. Weiterhin können aus der Abbildung 2.4 die Gastemperaturen entnommen werden, die über dem Zentrum des jeweiligen Brandes auftraten. Der Beginn der Datenaufnahme ist die Entzündung des Brandes.

Tabelle 2.2: Versuchsparameter und Wärmefreisetzungsraten der Versuchsreihe in Runehamar [INGASON 2005], [LÖNNERMARK 2005]

Versuchsnummer	Brenngut	Gesamtenergieinhalt (GJ)	Maximale HRR (MW)	Zeit von Zündung bis max. HRR (min)
T1	Paletten aus Holz und Polyethylen	247	201,9	18,5
T2	Holzpaletten und Polyurethanmatten	135	156,6	14,1
T3	Möbel und Autoreifen	179	118,6	10,0
T4	Polystyrolbecher in Pappkartons auf Holzpaletten	62	66,4	7,4

In der Runehamar-Versuchsreihe wurden unterschiedliche Materialien als Brandgut ausgewählt, um sowohl verschiedene Brandentwicklungen als auch unterschiedliche Wärmefreisetzungsraten zu bewirken. Die Verwendung von Paletten aus Holz und Polyethylen war durch den größten Energieinhalt der Brandmasse charakterisiert und verursachte auch die höchste Wärmefreisetzungsrate im Rahmen dieser Tests. Der Wert lag bei 202 MW. Bedingt durch die große Brandlast wurde auch die längste Branddauer verzeichnet mit einer maximalen Gastemperatur von 1365 °C. Vor der Durchführung der Runehamar-Versuche bestand die Meinung, dass Wärmefreisetzungsraten in den hier gefundenen Dimensionen nur von Tanklastwagen verursacht werden können.

Für die Holzpaletten und Polyurethanmatten als Brandmasse wurde mit 17 MW/min die größte Geschwindigkeit der Brandentwicklung gemessen.

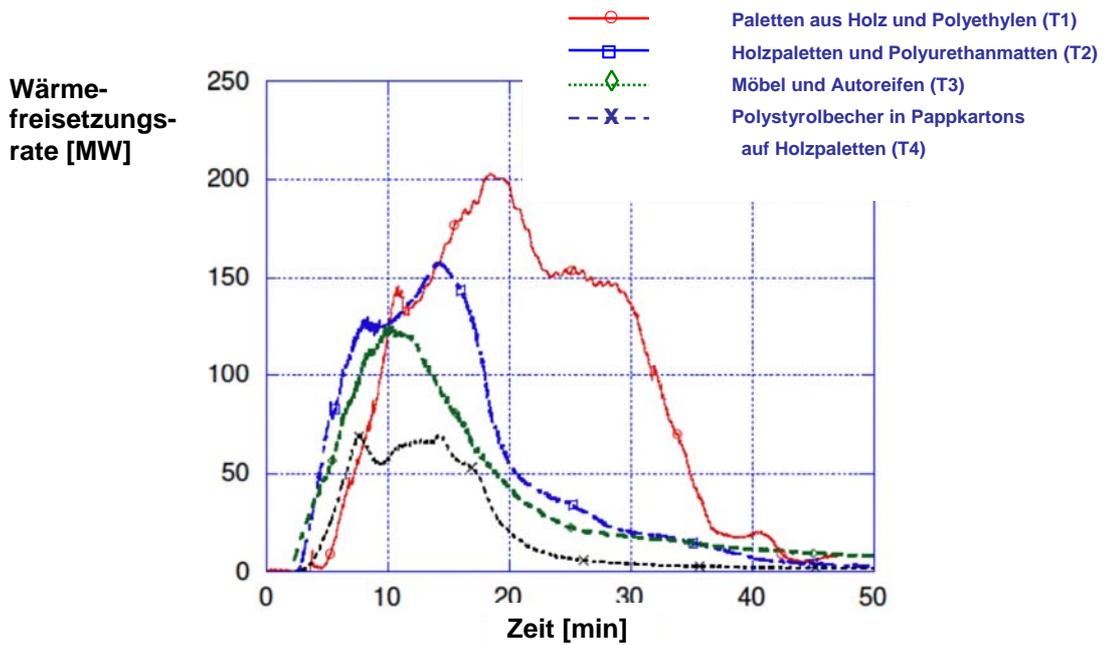


Abbildung 2.3: Wärmefreisetzungsraten der Versuchsreihe in Runehamar [INGASON 2005]

Die Temperatur verlief in Abhängigkeit von der Zeit beim Einsatz von Holzpaletten und Polyurethanmatten (T2), Möbeln und Autoreifen (T3) und Polystyrolbechern in Pappkartons auf Holzpaletten (T4) als Brandgut sehr analog (Abbildung 2.4). Einer anfänglichen Verzögerung folgte ein sehr steiles Anwachsen der Temperatur. Kurz nach diesem sehr schnellen Temperaturanstieg war in allen drei Experimenten das Temperaturmaximum erreicht. In allen drei Fällen dauerte die Phase von Zündung bis Temperaturmaximum weniger als 15 Minuten.

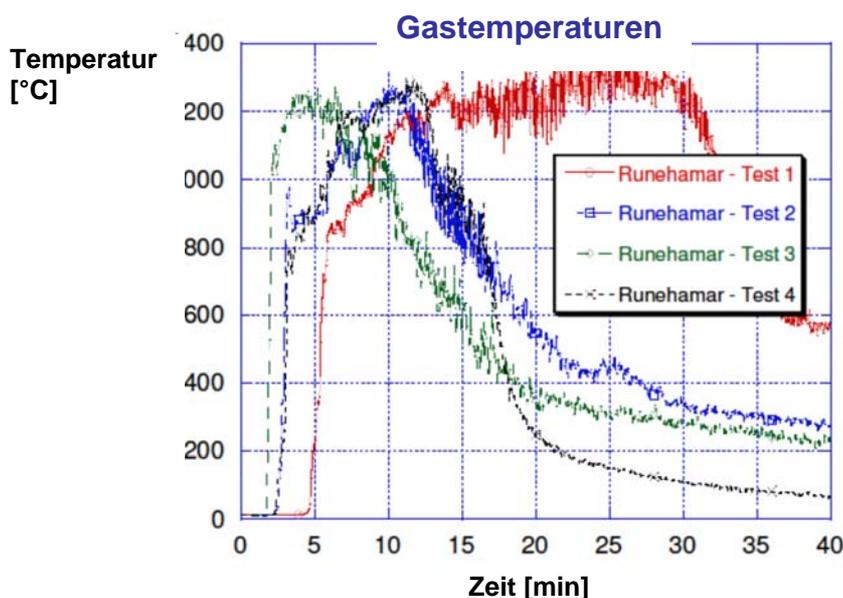


Abbildung 2.4: Gastemperaturen über dem Brandherd in der Versuchsreihe in Runehamar [LÖNNERMARK 2005]

Als Vergleich zu den vorgestellten Ergebnissen der Runehamar-Versuche werden in der Abbildung 2.5 Wärmefreisetzungsraten aus anderen Tests präsentiert.

Wärmefreisetzungsraten von großen Fahrzeugen

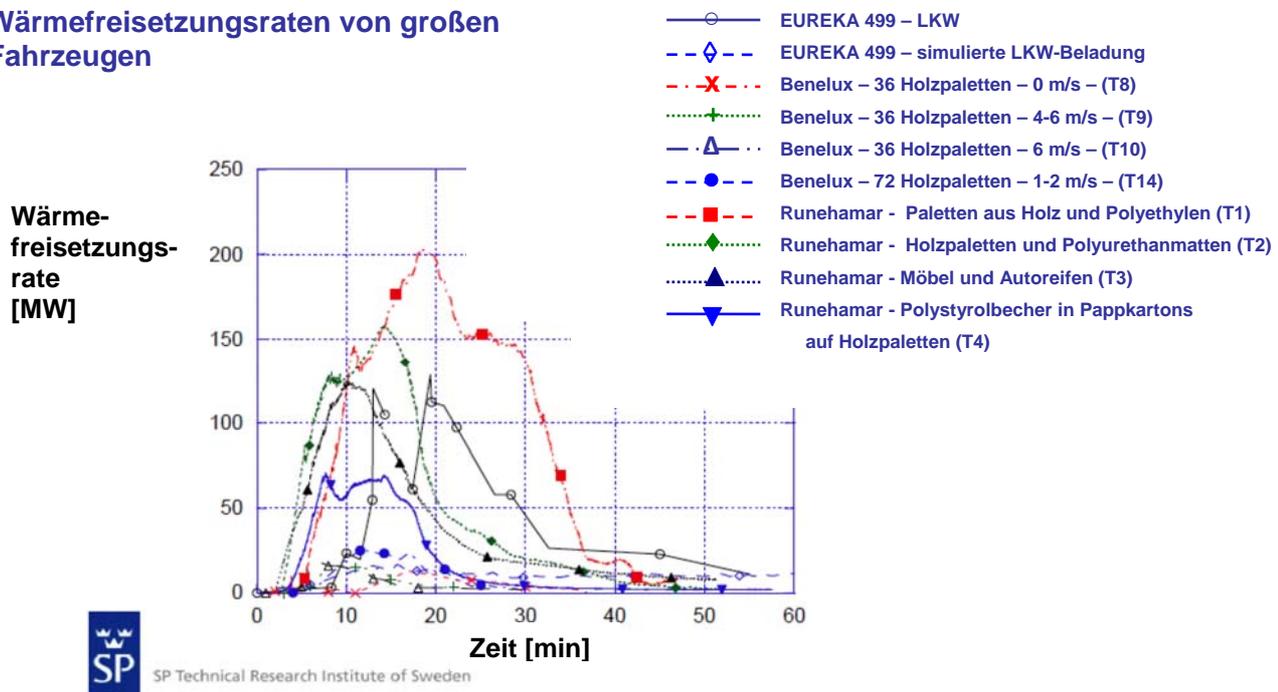


Abbildung 2.5: Gemessene Wärmefreisetzungsraten bei Verwendung von großen Brandlasten [LÖNNERMARK 2005]

Das EUREKA 499-Tunnel-Versuchsprogramm beinhaltete einen Test, der den Runehamar-Versuchen in der Versuchskonzeption vergleichbar war [EUREKA 1995], [FRENCH 1994]. Ein LKW trug eine Ladung mit der Masse von 1994 kg, die zu 75 % aus Materialien auf Zellulosebasis und zu 25 % aus Polymerwerkstoffen bestand. Der gesamte Energieinhalt, der in Form von Wärme freigesetzt werden konnte, wies einen Wert von 87,4 GJ auf. Die Strömungsgeschwindigkeit der Längsströmung wurde zu Versuchsbeginn bei 5 – 6 m/s eingestellt. 13,5 Minuten nach Zündung bewirkte der LKW bei Vollbrand eine Wärmefreisetzungsraten von etwa 120 MW. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Längslüftung eingestellt für die Dauer von drei Minuten. Anschließend wurde die Strömungsgeschwindigkeit der Längslüftung auf dem verringerten Niveau von 2 – 3 m/s gehalten. Die Wärmefreisetzungsraten wuchs sehr schnell wieder bis 128 MW.

In der Benelux-Tunnel-Testserie wurde im Unterschied zu den bisher beschriebenen Versuchsreihen eine Variation der Strömungsgeschwindigkeit vorgenommen [LEMAIRE 2002]. Als Brandlast wurden Holzpaletten ausgewählt. Unter den Bedingungen der natürlichen Tunnelbelüftung wurde eine Wärmefreisetzungsraten von 13,5 MW verzeichnet. Bei der Strömungsgeschwindigkeit der Längslüftung von 4 – 6 m/s stieg sie auf 19 MW und

verblieb bei 16,5 MW bei 6 m/s. Somit war die Wärmefreisetzungsrate bei Längslüftung um den Faktor 1,4 bzw. 1,2 erhöht gegenüber dem ermittelten Wert bei natürlicher Lüftung. Andererseits steigerte sich die Wachstumsgeschwindigkeit des Brandes sogar um den Faktor 4 – 6 bei Längslüftung im Vergleich zur natürlichen Belüftung.

In die Versuchsreihe von Runehamar waren Untersuchungen zu den Ursachen und Bedingungen zum Auftreten eines Feuerübersprungs bei Tunnelbränden eingeschlossen [LÖNNERMARK 2006]. Zu diesem Zweck wurden auf der Abströmseite des Ursprungsbrandes in definierten Entfernungen Gegenstände aus Polymermaterial oder aus Holz auf der Fahrbahnoberfläche platziert. Mit Hilfe einer Videokamera wurde der Zeitpunkt der Entzündung dieser Gegenstände aufgezeichnet. In der Tabelle 2.3 sind die Ergebnisse im Überblick dargestellt.

Tabelle 2.3: Ergebnisse zu den Untersuchungen des Feuerübersprungs in der Runehamar-Versuchsreihe [LÖNNERMARK 2006]

Entfernung zum Brand (m)	T1	T2		T3		T4	
	Polymer	Holz	Polymer	Holz	Polymer	Holz	Polymer
20							verbrannt
25							verbrannt
27							verbrannt
35		verbrannt	verbrannt				
42				verbrannt	verbrannt	unveränd.	verbrannt
50		verbrannt	verbrannt				
52				verkohlt	verbrannt		
53,5	verbrannt						
57						unveränd.	verbrannt
62				verkohlt			
67						unveränd.	verformt
70		verrußt	verbrannt				

Die Untersuchungen zum Feuerübersprung in der Runehamar-Versuchsreihe brachten zum Ausdruck, dass bei ansteigender Wärmefreisetzungsrate eines Brandes die Distanz wächst, bei der Objekte noch vom Brand erfasst werden können. Lönnermark und Ingason nutzten die Gesamtheit der Ergebnisse aus den Versuchen T1 bis T4, um den Zusammenhang zwischen der Wärmefreisetzungsrate und der Reichweite des Feuerübersprungs mathematisch

zu modellieren. Diese Betrachtungen bildeten die Grundlage für die Aussage, dass unter den Bedingungen der Reihe T1, d.h. bei einer Wärmefreisetzungsrate von 202 MW Gegenstände aus Holz in einer Entfernung von 70 m und Gegenstände aus Polymermaterial in einer Entfernung von 95 m entzündet werden könnten. Damit nahm die Länge der Flammen unter diesen Bedingungen den dreifachen Wert an, verglichen mit der Flammenlänge eines 202 MW-Brandes im Freien. Da sich die Gegenstände bei den Experimenten auf der Fahrbahnoberfläche befanden, muss die Entzündung durch Wärmestrahlung ausgelöst worden sein, die als Folge des großen Temperaturunterschiedes zwischen den oberen Luftschichten im Tunnel und der Fahrbahnoberfläche auftrat. Für die Entzündung durch Wärmestrahlung ist sowohl für Holz [DRYSDALE 1992] als auch für die Entzündung von natürlichen oder synthetischen organischen Materialien [KANURY 2002] eine Temperatur von 600 °C notwendig. Wärmekonvektion und direkter Kontakt der Gegenstände mit den Flammen spielten unter den beschriebenen Bedingungen eine untergeordnete Rolle.

Entsprechend der Videoaufzeichnungen der Versuche fand der Feuerübersprung bei T1 nach 6 Minuten nach Zündung, bei T2 nach 3,3 bis 3,4 Minuten und bei T3 nach 4,5 Minuten statt. Das bedeutet, dass die Wärmefreisetzungsrate zwischen 20 MW bis 40 MW lag bei einer Strömungsgeschwindigkeit der Längslüftung von 2-3 m/s.

Im Unterschied dazu kommen bei Objekten mit einer großen Höhe wie Lastkraftwagen die beiden Komponenten des Wärmeflusses zur Geltung, d.h. Wärmefluss durch Strahlung und Konvektion. Auf der Basis der Messwerte der Runehamar-Versuche kann kalkuliert werden, dass bei angenommener vollständiger Gasvermischung im Tunnel ein 220 MW-Brand eine Gastemperatur von ca. 760 °C verursachen würde. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit der Gase von 3 m/s und einer Außentemperatur von 10 °C würde der Anteil, den die Konvektion zur Wärmefreisetzungsrate beisteuert, bei 70 % liegen. Weiterhin kann bei hohen Objekten die direkte Flammeneinwirkung zum Entstehen des Feuerübersprungs beitragen. Daher muss davon ausgegangen werden, dass Gegenstände, die sich in noch größeren Entfernungen zum Brandherd befinden im Vergleich zu den in den Runehamar-Versuchen angewendeten Dimensionen, entzündet werden können.

2.2 Risikobetrachtungen für Straßentunnel bei Transporten mit großen Brandlasten oder Gefahrgütern

Stoffe und Gegenstände, die beim Transport Risiken in sich bergen können, müssen entsprechend des Gesetzes über die Beförderung gefährlicher Güter als Gefahrgüter eingestuft werden. Im Zuge der Kategorisierung der Tunnel werden die Gefahrgüter Tunnelkategorien zugeordnet. Die Kriterien für dieses Konzept sind die Arten der Gefährdungen, die die Stoffe beinhalten. Im Einzelnen sind dies:

- sehr große Explosionen
- große Explosionen
- Freiwerden giftiger Stoffe
- große Brände [ADR 2007].

Wie jedoch in den Anlagen dieses Berichtes dargestellt wurde, können auch Brände ohne Beteiligung von Gefahrgütern im klassischen Sinn extreme Dimensionen annehmen. Frachten, die unter diesem Aspekt zu betrachten wären, sind zum Beispiel Kunststoffprodukte, Holz oder allgemein Stoffe, die hohe Brandlasten oder toxische Rauchgase entwickeln können [STUVA 2000]. Parallel zu dieser Feststellung gehen ebenfalls die Ergebnisse der Versuchsreihe zu großen Bränden in Runehamar (siehe Tabelle 2.3). Auch kann die Kombination von Stoffen, die einzeln als absolut ungefährlich zu bewerten sind, im Brandfall katastrophale Wirkungen haben, wie der Brand im Mont Blanc-Tunnel 1999 zeigte. Dies bedeutet, dass eine Beurteilung des Risikos dann schwieriger wird, wenn der Begriff Gefahrgut entsprechend der Gefahrgutverordnung nicht mehr anwendbar ist.

Einerseits sollten Gefahrgüter und Frachten mit hohen Brandlasten nicht generell von einem Transport ausgeschlossen werden, andererseits muss das Risiko minimiert werden. Es ist auf der Basis einer Risiko-Abschätzung zu entscheiden, in welchem Umfang und unter Einhaltung welcher Randbedingungen, Gefahrguttransporte durch Tunnel zugelassen werden [STUVA 2000]. Bei der Risikobetrachtung sind Strecken mit und ohne Tunnel einander gegenüberzustellen unter Einbeziehung folgender wichtiger Faktoren:

- Gefahrgüter bzw. hohe Brandlasten
- Gegenverkehr oder Richtungsverkehr
- Verkehrsaufkommen im Tunnel
- Lage des Tunnels
- Tunnelauslastung
- Verkehrsregelung.

Wenn die Risikobeurteilung zu der Entscheidung gelangt, dass der Gefahrguttransport durch den Tunnel gar nicht oder nur eingeschränkt zugelassen werden kann, gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Kontrolle oder Begleitung der Bestimmungen. Hier soll nachfolgend nur auf zwei Maßnahmen eingegangen werden, die für Einsatzkräfte im Fall eines Brandes oder Unfalls im Zusammenhang mit Gefahrstoffen wesentliche Informationen zur Verfügung stellen können: Es sind dies die Begleitung von Gefahrguttransporten bei der Tunneldurchfahrt sowie die automatische Gefahrguterkennung.

Eine systematische Begleitung von Gefahrguttransporten sollte insbesondere bei mit Wasser unverträglichem Frachtgut vorgeschrieben werden. Die Kommunikation mit der Tunnelüberwachung kann in Situationen, die eine Beregnung des Tunnels erforderlich machen, gewährleisten, dass der Bereich mit dem Gefahrgutzug von der Beregnung ausgenommen wird.

Am Beispiel des Tunnels Allach auf der A 99 wurde die automatische Gefahrguterkennung vor den Tunnelportalen mit Hilfe der Laser-Scanner-Technologie getestet [FELDGES 2010]. Das Erkennen und Registrieren der Gefahrgut-LKW erfolgte über das Scannen des UN-Codes. Dieses wird in den Abbildungen 2.6 und 2.7 veranschaulicht. Im Rahmen dieses Tests wurden Aussagen zum Umfang und zur zeitlichen Verteilung der transportierten Gefahrgüter ermöglicht. Darüber hinaus konnte eine Differenzierung der Gefahrgüter vorgenommen werden. Im gewählten Beispiel nahmen Treibstoffe den größten Anteil am Gesamtvolumen der Gefahrgut-Fracht ein (Abbildung 2.8).



Abbildung 2.6: Automatische Gefahrguterfassung mit Hilfe der Laser-Scanner-Technologie [FELDGES 2010]



Abbildung 2.7: Scannen des UN-Codes bei der automatischen Gefahrguterfassung [FELDGES 2010]

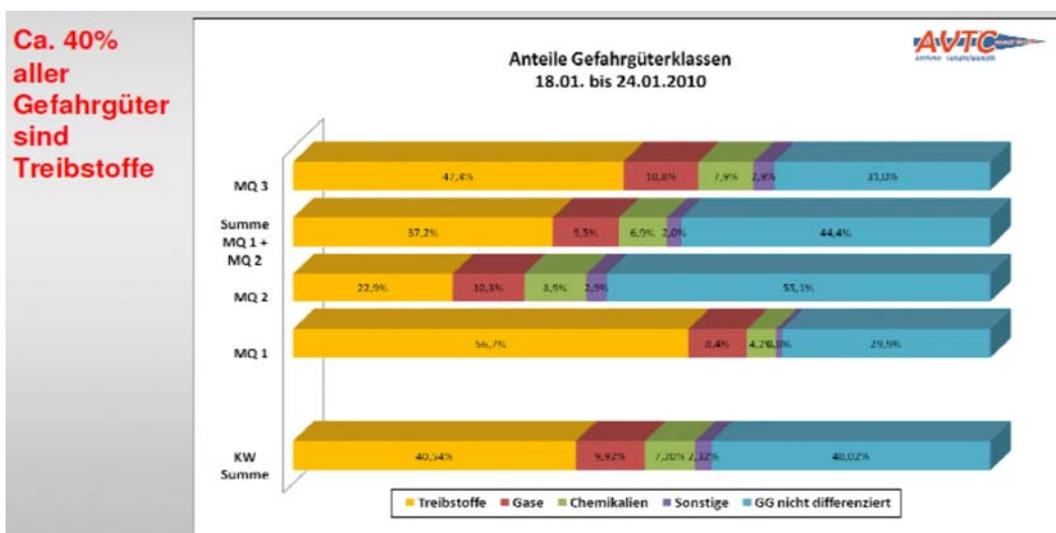


Abbildung 2.8: Anteile verschiedener Gefahrgüter am gesamten transportierten Gefahrgutaufkommen [FELDGES 2010]

2.3 Wirksamkeit der Rauchabsaugung bei Tunnelbränden

Die Rauchentwicklung eines Fahrzeuges ist von der Brandleistung abhängig. Beim Brand eines Personenwagens wird eine Rauchmenge von 20 m³/s freigesetzt [PIARC 1999]. Beim typischerweise für die Dimensionierung von Lüftungsanlagen vorausgesetzten Brand eines Lastwagens ohne brennbare Ladung wird von einer Rauchleistung von 80 m³/s ausgegangen [BETTELINI 2003a]. In der Abbildung 2.9 sind die Brand- und Rauchleistungen dargestellt, die bei einem Fahrzeugbrand zu erwarten sind.

Die Lüftungssysteme von Tunnelanlagen werden in natürliche und in mechanische Lüftungen unterteilt, wobei mechanische Lüftungen mit und ohne Rauchabsaugung unterschieden werden. Bei Lüftungsanlagen mit Rauchabsaugung besteht die Möglichkeit,

große Rauchmengen mit Hilfe einzeln steuerbarer Abluftklappen gezielt in der Nähe des Brandes aus dem Fahrraum des Tunnels abzusaugen und über einen Abluftkanal abzuführen.

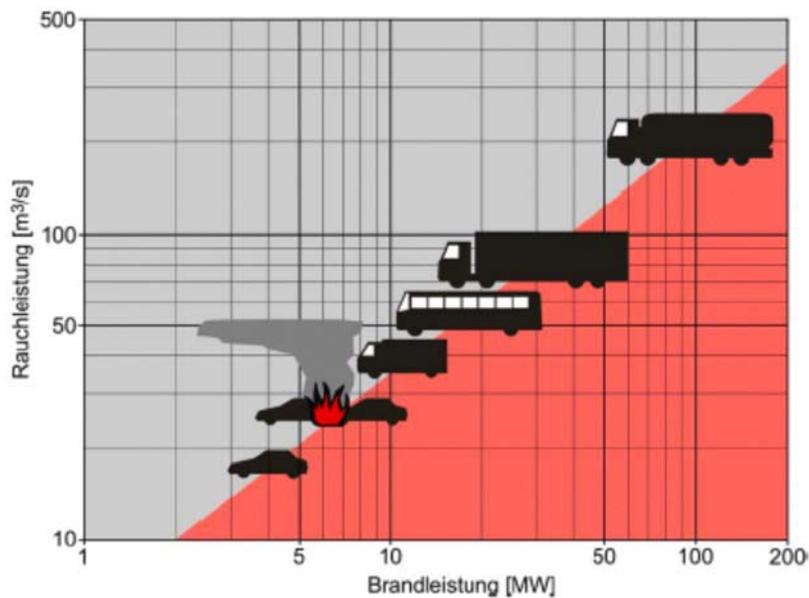


Abbildung 2.9: Maximale Brand- und Rauchleistung beim Brand unterschiedlicher Straßenfahrzeuge [SCHWEIZERISCHER FEUERWEHRVERBAND 2005]

Die Wirkung der unterschiedlichen Tunnelbelüftungsarten auf die Temperatur- und Rauchgasausbreitung war das primäre Ziel einer umfangreichen Versuchsreihe, die in den Jahren 1993 bis 1995 im Memorial Tunnel, einem stillgelegten Straßentunnel im US-Bundesstaat West Virginia durchgeführt wurde [SCHULER 2005]. Der Memorial Tunnel wies eine Länge von 850 m und eine Steigung von 3,2 % auf. Ohne Zwischendecke hatte er eine Querschnittsfläche von etwa 60 m². Es wurden insgesamt 98 Versuche mit Brandlasten von 10, 20, 50 und 100 MW durchgeführt. Gemessen wurden in der gesamten Tunnellänge an verschiedenen Positionen die Temperatur, die Luftgeschwindigkeit, die CO₂- und CO-Konzentration sowie die Sichttrübung.

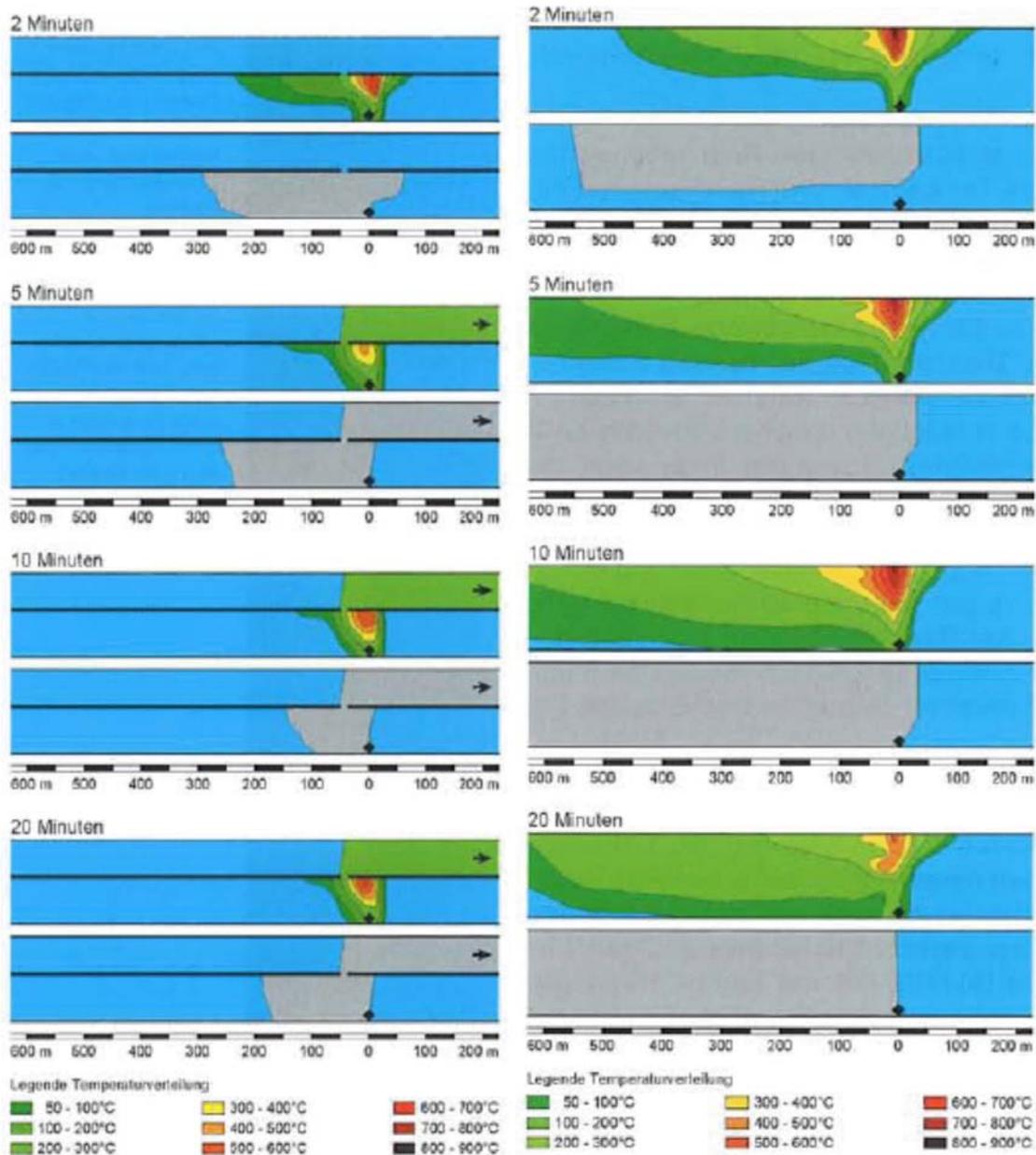


Abbildung 2.10: Temperatur- und Rauchausbreitung bei Anwendung der Rauchabsaugung (links) und bei natürlicher Tunnellüftung (rechts) [SCHULER 2005], Erläuterungen im Text

Bei Anwendung der Rauchabsaugung wurde im Tunnel eine Zwischendecke mit einem Abluftkanal eingebaut. Es liefen Tests mit verschiedenen großen und unterschiedlich platzierten Absaugöffnungen. Weiterhin wurden die Absaugleistung und die Zeitspanne bis zum Anlaufen der Lüftung variiert. Die Abbildung 2.10 zeigt die Temperatur- und Rauchausbreitung eines Versuchs mit einer Brandleistung von 50 MW. Die Rauchabsaugung erfolgte in diesem Fall über eine einzelne 18 m² große Öffnung, die etwa 50 m vom Brandherd stromabwärts angeordnet war. Die Absaugmenge betrug in diesem Beispiel 400 m³/s. Die Lüftung lief zwei Minuten nach Brandausbruch an. Aus der Abbildung 2.10 ist ersichtlich, dass die Temperatur- und Rauchausbreitung unter den beschriebenen Bedingungen auf eine Länge von 100 bis 200 m begrenzt werden konnte. Als Vergleich sind

in der Abbildung 2.10 die Ergebnisse eines Versuches enthalten, bei dem nur die natürliche Tunnellüftung wirksam wurde. Es ist zu erkennen, dass bereits nach drei Minuten der gesamte Tunnelquerschnitt mit Rauch erfüllt war. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauches betrug 4 m/s.

3 MOBILE BRANDBEKÄMPFUNG VON TUNNELBRÄNDEN

Die Erfahrungen aus den schweren Straßentunnelbränden in den letzten zwei Jahrzehnten haben zu der Erkenntnis geführt, dass für die Bekämpfung von Tunnelbränden der Grundsatz „Löschen um zu retten“ gelten sollte [EGGER 2002], [GRUBER 2010], [KIM 2010], [STAMPFLI 2011]. Egger beschreibt den Kern dieser Taktik als „Verzögerungskonzept“. Stampfli sieht die Notwendigkeit für dieses Vorgehen darin begründet, dass alle weiteren Maßnahmen wesentlich wirksamer werden, je schneller der Brand unter Kontrolle gebracht wird:

- Die durch den Brand verursachte extreme Hitze- und Raumentwicklung behindert sowohl die Selbstrettung der Tunnelnutzer als auch die Aktionen der Einsatzkräfte der Feuerwehr
- Das Tunnelbauwerk wird sehr schnell in Mitleidenschaft gezogen.

Die frühzeitige Brandbekämpfung muss zwingend koordiniert werden mit einer unterstützenden Lüftungssteuerung und entsprechenden Rauchableitung. Dieses wiederum erfordert eine Abstimmung der Maßnahmen zwischen Tunnelzentrale und Feuerwehr bzw. eine exakte Kenntnis der Lüftungstechnik durch die Feuerwehr selbst.

Die Fokussierung der Einsatzmaßnahmen auf eine schnellstmögliche Brandbekämpfung wird unterstützt durch die Ergebnisse von Versuchsreihen, die sich auf die Charakterisierung von LKW-Bränden mit verschiedener Ladung in Tunneln konzentrierten. Diese Untersuchungen veranschaulichten sehr deutlich die Unterschiede zwischen LKW-Bränden im Freien und in Tunneln.

3.1 Taktische Vorgehensweise und Ausrüstung der Feuerwehr bei Tunnelbränden

Die Erfahrungen aus den großen Tunnelbränden in den vergangenen zwei Jahrzehnten und die Ergebnisse aus den Versuchsreihen mit großen Brandlasten haben vorherrschend zu der Entscheidung geführt, insbesondere auch Tunnelbrände mit erheblichen Dimensionen mit einer „2-Seiten-Taktik“ zu bekämpfen [FISCHER 2011], [GRUBER 2010], [KIM 2010], [SCHWEIZERISCHER FEUERWEHR-VERBAND 2005], [STAMPFLI 2011]. Dies bedeutet, dass die Feuerwehr den Angriff an beiden Tunnelportalseiten gleichzeitig einleitet. [KIM 2010] bezeichnet diese Vorgehensweise auch als eine offensive Strategie. [FISCHER 2011] begründet sie mit folgenden zwei Argumenten:

- Verringerung des Angriffswegs
- Größere Flexibilität durch situative Anpassung des Angriffswegs.

Jedoch muss auch in diesem Zusammenhang an wesentliche Informationen aus der Runehamar-Versuchsreihe erinnert werden. Es wurden die Temperaturen sowie die Werte für die Wärmestrahlung in Abhängigkeit von der Entfernung zum Zentrum des Brandes auf der Anströmseite gemessen. In den Abbildungen 3.1 und 3.2 sowie in der Tabelle 3.1 sind die entsprechenden experimentellen Daten zusammengefasst [LÖNNERMARK 2004], [LÖNNERMARK 2005], [LÖNNERMARK 2005 a] (T1 bis T4 vgl. Tabelle 2.2).

Tabelle 3.1: Maximale Werte der Wärmestrahlung auf der Anströmseite in Abhängigkeit der Entfernung zum Brandzentrum in der Runehamar-Versuchsreihe [LÖNNERMARK 2004], [LÖNNERMARK 2005], [LÖNNERMARK 2005 a]

Versuchsnummer	Wärmestrahlung - 5 m Entfernung zum Brand (Anströmseite) (kW/m ²)	Wärmestrahlung - 10 m Entfernung zum Brand (Anströmseite) (kW/m ²)	Wärmestrahlung - 20 m Entfernung zum Brand (Anströmseite) (kW/m ²)
T1	80	14	2
T2	35	18	3
T3	20	9	2
T4	40	10	4 (15 m)

Die Messungen zeigen, dass nach einer anfänglichen Verzögerung die Wärmefreisetzungsraten und die Gastemperaturen sehr steil ansteigen. Dieser Befund unterstreicht nachdrücklich, dass alle Maßnahmen zur Brandbekämpfung, die in diesem Zeitraum eingeleitet werden können, über das Ausmaß der Brandentwicklung entscheiden. Die hohen Temperaturen und die Wärmestrahlung, die sogar auf der Anströmseite bei einem voll entwickelten Brand auftreten, verhindern, dass die Einsatzkräfte der Feuerwehr sich ausreichend dem Brand nähern können, um ihn effizient zu löschen. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Wärmestrahlung von 5 kW/m² nach etwa fünf Minuten Einwirkzeit bei Einsatzkräften in Schutzkleidung Schmerzen verursacht [LÖNNERMARK 2005 a]. Für länger andauernde Einsatzzeiten sollte daher die Intensität der Wärmestrahlung bei niedrigeren Werten liegen. Unter den Bedingungen der Runehamar-Versuchsreihe würde diese Forderung bei einer Entfernung von 20 m zum Brandherd auf der Anströmseite erfüllt sein. Es liegen bisher nicht ausreichende Erfahrungen vor, ob ein intensiver Brand aus dieser Entfernung erfolgreich bekämpft werden kann.

Wärmestrahlung auf der Anströmseite in einer Entfernung von 10 m zum Brand

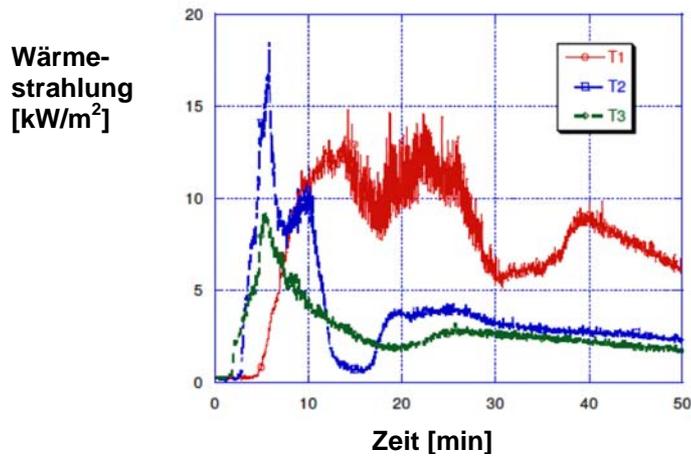


Abbildung 3.1: Wärmestrahlung auf der Anströmseite in Abhängigkeit von der Zeit und der Brandlast bei den Runehamar-Versuchen [LÖNNERMARK 2004]

Gastemperaturen auf der Anströmseite (T 1)

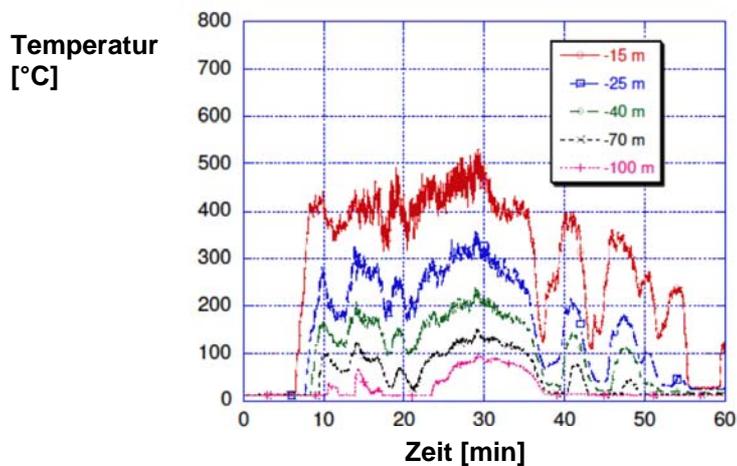


Abbildung 3.2: Gastemperaturen auf der Anströmseite in Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung zum Brand bei den Runehamar-Versuchen [LÖNNERMARK 2004]

3.2 Klassifizierung von Bränden in Straßentunneln für Feuerwehreinsätze

In der Arbeit „Effective Firefighting Operations in Road Tunnels“ [KIM 2010] werten Kim, Lönnermark und Ingason 69 Brände in Straßentunneln hinsichtlich der Brandursachen, des Brandverlaufs und der Einsatzmaßnahmen der Feuerwehr aus. Im Anhang sind diese Daten in Tabellenform zusammengefasst. Eine Auswahl dieser Ereignisse ist in Tabelle 3.2 enthalten.

Tabelle 3.2: Brände in Straßentunneln [KIM 2010]

Jahr	Tunnel Name Land Länge (km)	In Brand geratenes Fahrzeug	Mögliche Brandursache oder Stelle des Brandes	Ereignisart	Brandbekämpfung
2005	Frejus Frankreich/ Italien(12,9)	LKW Ladung Reifen	Motorbrand	Einzelbrand, Brandausbreitung	Brand gelöscht vor Übergriff auf Klebstoffladung im 4. LKW
2004	Frejus Frankreich/ Italien (12,9)	LKW	Bremssystem	Einzelbrand	Brand war leicht zu löschen
2003	Fløyfjell Norwegen (3,1)	PKW	Kollision mit der Wand und Brand	Kollision (Wand) und Brand, keine Brandausbreitung	Eintreffen der FW nach 6 min, Fahrzeugbrand schnell gelöscht
	Locica Slovenien (0,8)	LKW Fracht Alu-Träger	-	Einzelbrand	FW löschte Brand bei Ankunft
2002	Tauern Österreich (6,4)	LKW	defektes Antriebssystem	Einzelbrand	FW konnte Brand schnell unter Kontrolle bringen
2001	Gleinalm (7. August) Österreich (8,3)	PKW	Frontalzusammenstoß zwischen LKW und PKW	Kollision und Brand, keine Brandausbreitung	Brand wurde in kurzer Zeit von der FW erfolgreich gelöscht
	St. Gotthard Schweiz (16,9)	2 LKW einer hatte Gummireifen geladen	Frontalzusammenstoß zweier Lkw	Kollision und Brand, Treibstoffaustritt, Brandausbreitung	im Erstangriff konnte die FW den Brand im Frühstadium nicht löschen
	Tauern Österreich (6,4)	2 PKW	Frontalzusammenstoß	Kollision und Brand, keine Brandausbreitung	Brand schnell gelöscht vom Fahrer eines der Autos
2000	Lærdal Norwegen (24,5)	Bus mit ungefähr 50 Passagieren	-	Einzelbrand	Brand war klein und leicht vom Busfahrer zu beheben
	Saukopf Deutschland (2,7)	PKW	-	Einzelbrand	FW konnte den Brand leicht löschen
	Cross-harbour Hong Kong (1,9)*	PKW	-	Einzelbrand	Notfallhilfe traf innerhalb von 3 min ein, war aber nicht in der Lage, den Brand unter Kontrolle zu bringen, FW traf 2 min später ein
	Tauern Österreich (6,4)	LKW	-	Einzelbrand	Brand wurde schnell unter Kontrolle gebracht und innerhalb einer halben Stunde von beiden Seiten des Fahrzeugs aus durch die FW gelöscht

1999	Candid Deutschland (0,252)	PKW	Motorraum	Einzelbrand	Bedingt durch den Verkehrsstrom benötigte die FW eine lange Zeit, um den Brand zu erreichen, löschte dann schnell
	Tauern Österreich (6,4)	LKW mit einer Fracht Spraydosen mit Farben	Auffahrunfall von 4 PKW und 2 LKW	Kollision und Brand, Kraftstoffaustritt, Brandausbreitung	der voll entwickelte Brand konnte bis zu einem sehr späten Zeitpunkt nicht gelöscht werden
	Mont Blanc Frankreich/ Italien (11,6)	LKW mit Mehl und Margarine	Diesekraftstoff lief aus und traf auf heiße Oberflächen des Motorraumes	Öl-Leckage und Brand, Brandausbreitung	die FW konnte sich im Erstangriff dem Brand nicht einmal nähern
1990	Mont Blanc Frankreich/ Italien (11,6)	LKW mit 20 Tonnen Baumwolle	Motor	Einzelbrand	Franz. FW traf innerhalb von 10 min ein, trotz des Umstandes, dass der Brand sich zu diesem Zeitpunkt ausgebreitet und alle Fahrzeuge erfasst hatte, konnte die FW das Feuer kontrollieren und löschen
1988	Mont Blanc Frankreich/ Italien (11,6)	1 LKW	-	Einzelbrand	als die französischen FW-Kräfte eintrafen, konnten sie das Feuer löschen
1986	Herzogberg Österreich (2)	LKW	Bremsen überhitzt	Einzelbrand	obwohl die FW über 20 min benötigte, um einzutreffen, wurde der Brand schnell gelöscht
1976	San Bernardino Schweiz (6,6)	Bus mit 33 Insassen	Überhitzung im Motorraum	Einzelbrand	Rettungsmaßnahmen begannen 4 min nach der Alarmierung, Angriff der FW war sehr schnell, Brand breitete sich nicht aus
1974	Mont Blanc Frankreich/ Italien (11,6)	LKW	Motor	Einzelbrand	die französische FW traf schnell vor Ort ein, trotz dichtem Rauch konnte der Brand schnell gelöscht werden

* Angabe wurde nach eigener Recherche hinzugefügt [CROSS-HARBOUR]

Die aufgelisteten Brände können in erster Linie in zwei Kategorien gruppiert werden:

Einzelbrände

In diese Kategorie fallen Brände, bei denen bei der Brandentstehung und -entwicklung nur ein Fahrzeug betroffen ist. Aus der Übersicht zu den Bränden ist zu entnehmen, dass diese Brände sich vergleichsweise langsam ausdehnen, wenn nicht ein zusätzlicher Faktor wie ausgelaufener Kraftstoff oder eine Explosion hinzukommen. Oftmals sind bereits zu Beginn Rauch oder Flammen zu beobachten, so dass Fahrer benachbarter Fahrzeuge in geeigneter Weise reagieren können.

Kollisionsbrände

Zu dieser Kategorie zählen Brände, an deren Brandentstehung bereits mehrere Fahrzeuge beteiligt sind auf Grund eines Verkehrsunfalls, z.B. durch Kollision zweier Fahrzeuge. Diese Brände entwickeln sich in der Regel sehr schnell und können in ein Ausmaß münden, das schwer zu kontrollieren ist. Oftmals verursachen sie panische Reaktionen der anderen Tunnelnutzer.

Unter den in Tabelle 3.2 betrachteten 69 Tunnelbränden sind 48 (69,6 %) als Einzelbrände und 21 (30,4%) als Kollisionsbrände einzustufen.

Eine vergleichbare Analyse, die von der STUVA/STUFAtec GmbH angefertigt wurde, führt zu dem Ergebnis, dass ca. 62 % der untersuchten Brände durch technische Defekte am Fahrzeug ausgelöst wurden, während weitere ca. 34 % der Brände durch Auffahrunfälle in Straßentunneln verursacht wurden [STUVA 2000]. In der letztgenannten Arbeit wurden 29 Brände in Straßentunneln ausgewertet.

Im Zuge einer weiterführenden Untergliederung der bewerteten Tunnelbrände ziehen Kim, Lönnermark und Ingason einen Feuerübersprung zu anderen Fahrzeugen als Klassifizierungskriterium heran.

Es resultieren nun vier Klassen von Tunnelbränden:

Klasse 1 (K1)

Der Brand wird von einem einzelnen Fahrzeug verursacht und greift nicht auf andere Fahrzeuge über.

Klasse 2 (K2)

Der Brand geht von einem einzelnen Fahrzeug aus und pflanzt sich auf weitere Fahrzeuge fort.

Klasse 3 (K3)

Der Brand entsteht als Folge der Kollision von mehreren Fahrzeugen, bleibt aber auf diese Fahrzeuge beschränkt.

Klasse 4 (K4)

Der Brand wird verursacht durch die Kollision mehrerer Fahrzeuge und dehnt sich auf andere Fahrzeuge aus.

Die Zuordnung der von Kim u. a. analysierten Tunnelbrände in die vier Klassen kann aus Tabelle 3.3 entnommen werden. Die Fokussierung auf den Feuerübersprung als Unterscheidungsmerkmal dieser vier Klassen von Bränden resultiert aus der entscheidenden Wirkung des Feuerübersprungs auf die räumliche Ausdehnung eines Brandes und der damit verbundenen Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate.

Tabelle 3.3: Klassifizierung der Brände in Straßentunneln [KIM 2010]

Typ (%)	Klasse	Anzahl der Brände (%)	Anzahl nach Ort des ursprünglichen Brandes	Opfer
Einzelbrand ^{a)} (69,6 %)	K1	43 (63,3 %)	LKW: 25 Bus oder Reisebus: 14 PKW: 3 Autokran: 1	Opfer: 11 keine Opfer: 32
	K2	5 (7,3 %)	LKW: 5	bei allen Bränden traten Opfer auf
Kollisionsbrand (30,4 %)	K3	7 (10,1 %)	Motorrad + 2 PKW: 1 LKW + Bus o. PKW: 2 PKW + Wand: 2 PKW + PKW o. Bus: 2	in 5 Fällen traten Opfer auf
	K4	13 (18,8 %)	LKW + LKW: 1 LKW + PKW (Bus): 3 LKW (s) + PW: 5 LKW + Wand: 1 nicht bekannt: 3	bei allen Bränden traten Opfer auf
	nicht bekannt	1 (1,5 %)	nicht bekannt	nicht bekannt

^{a)} Ereignisse, bei denen nur Rauch ohne Flammen entstanden, wurden in die Einzelbrände integriert

Ausgehend von diesen 4 Klassen werden bei [KIM 2010] 6 verschiedene Brandszenarien für Einsatzstrategien der Feuerwehren in Abhängigkeit von dem zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (HRR) diskutiert. Abbildung 3.3 zeigt die charakteristischen Verläufe dieser 6 Szenarien, die anschließend erläutert werden. Dabei werden hinter der Bezeichnung des Szenarios in Klammern die Kategorie (Einzelbrand oder Kollisionsbrand) und die Brandklasse/n (K1 bis K4) angegeben, bei denen ein solches Szenario auftreten kann.

Zunächst noch eine allgemeine Bemerkung. Beginnt die Feuerwehr den Löscheinsatz bzw. wird eine stationäre Löschanlage ausgelöst, so kommt es zunächst häufig noch zu einem Anwachsen der HRR. Eine Ursache hierfür ist, dass mit dem Löschmittel durch die Luftströmung auch Sauerstoff dem Brand zugeführt wird. Ist die Löschintensität groß genug, so fällt die HRR jedoch wieder ab und der Brand wird begrenzt und kann gelöscht werden. Wie stark und wie lange der Effekt auftritt, hängt von der konkreten Situation und von dem eingesetzten Löschverfahren ab. Er ist allgemein nicht quantifizierbar (vgl. Abbildung 3.2, Szenario A).

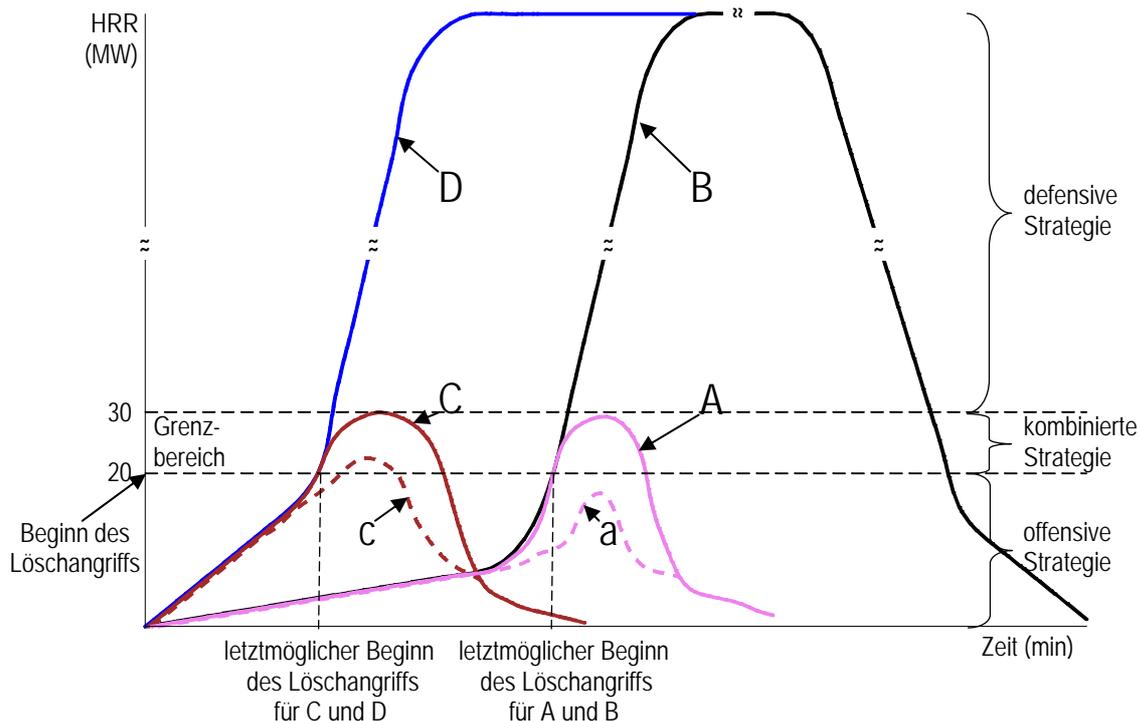


Abbildung 3.3: Abhängigkeit der Wärmefreisetzungsrates von der Zeit für verschiedene Tunnelbrandszenarien entsprechend der Klassifizierung von Kim u. a. [KIM 2010]

Szenario A (Einzelbrand, K1, K2)

Der Brand ist dadurch charakterisiert, dass er sich langsam entwickelt. Die weitere Ausbreitung kann durch das Eingreifen der Feuerwehr oder durch die Tunnelnutzer selbst grundlegend unterdrückt werden.

Die Brandbekämpfungsmaßnahmen müssen jedoch spätestens zum Zeitpunkt „letztmöglichster Beginn des Löschangriffs“ begonnen werden. Hat die Brandleistung eine gewisse Grenze überschritten, wird durch eine mobile Brandbekämpfung dieser Brand nicht zeitnah zu löschen sein.

Erfolgt der Löschangriff rechtzeitig, so überschreitet das Maximum der HRR nicht den Grenzbereich. Die Feuerwehr kann den Brand unter Kontrolle bringen.

Ein Beispiel hierfür ist der in Tabelle 3.2 aufgeführte Brand im Mont Blanc-Tunnel im Jahr 1990.

Szenario a (Einzelbrand, K1)

Im Unterschied zu A ist maximal ein Fahrzeug beteiligt. Die HRR ist nicht groß genug, um einen Feuerübersprung zu ermöglichen bzw. es sind keine weiteren

Brandlasten/Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe. Das Eingreifen der Feuerwehr ist nicht immer erforderlich.

Diese Situation ist typisch für die meisten kleinen Brände.

Szenario B (Einzelbrand, K2)

Zwei typische Situationen sind hier zu betrachten. Als Beispiel wird der Mont Blanc-Tunnelbrand von 1999 herangezogen. Aufgrund der schnellen Brandentwicklung hatte die Feuerwehr keine Chance aktiv zu werden, obwohl 5 Minuten nach der Detektion ein Fahrzeug auf der französischen Seite mit vier Einsatzkräften in den Tunnel einfuhr. Wegen der starken Verrauchung und der Wärmeentwicklung konnten sie nicht an den Brand herankommen und die Brandbekämpfung aufnehmen (s. Anlage A).

Es kann aber auch die Situation eintreten, dass die Feuerwehr zwar aktiv werden kann, jedoch die zum Einsatz kommende Löschintensität nicht ausreicht und der Brand sich weiter ausdehnen und nicht kontrolliert werden kann. Eine derartige Situation ist gegeben, wenn sie sich zwar auf der „upstream“ Seite nähern kann, jedoch auf der „downstream“ Seite die Brandausdehnung nicht unterdrücken kann. Der Zeitpunkt „letztmöglichster Beginn des Löschangriffs“ ist in beiden Fällen überschritten.

Szenario C (Kollisionsbrand, K3)

Bei diesem Szenario kommt es zu keiner weiteren Brandausbreitung. Die Feuerwehr nimmt vor dem Zeitpunkt „letztmöglichster Beginn des Löschangriffs“ die Brandbekämpfung auf und verhindert, dass die HRR den Grenzbereich überschreitet.

Szenario c (Kollisionsbrand, K3)

Bei diesem Szenario kommt es zu keinem Feuerübersprung. Der Einsatz der Feuerwehr ist nicht immer erforderlich.

Szenario D (Kollisionsbrand, K4)

Dieses Szenario ist mit einer sehr schnellen Brandentwicklung verbunden. Der Brand bleibt nicht begrenzt. Das Energiepotential ist so groß, dass es zu weiteren Feuerübersprüngen kommt. Dieses Szenario ist durch mobile Einsatzkräfte allein nicht beherrschbar.

3.3 Einteilung von Straßentunneln als Grundlage für Feuerwehreinsätze

Zusätzlich zur Kategorisierung von möglichen Brandszenarien in Straßentunneln nehmen Kim, Lönnermark und Ingason [KIM 2010] eine Einteilung der Straßentunnel selbst vor, um das Gefährdungspotential eines Straßentunnels aus der Sicht der Feuerwehr einschätzen zu können und dieses mit geeigneten Maßnahmen zu reduzieren. So kann zum Beispiel das Gefährdungspotential eines Straßentunnels, der einerseits durch ein hohes Brandrisiko charakterisiert wird und andererseits sich durch eine erhebliche Bedeutung für das Transportwegesystem auszeichnet, durch den Einbau einer stationären Löschanlage verringert werden.

Für die Klassifizierung der Straßentunnel ziehen Kim u.a. die folgenden vier Kriterien heran:

LKW-Aufkommen und Fahrzeuge, die Gefahrgüter transportieren

Bei der Klassifizierung der Brände in Tunneln war festgestellt worden, dass bei Bränden, in denen nur PKW oder Busse involviert waren, kein Feuerübersprung auftrat.

Typ des Tunnels

Unfälle in Straßentunneln zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für Kollisionsbrände oder Feuerübersprünge in Gegenverkehrstunneln höher ist als in Richtungsverkehrstunneln. Weiterhin ist bei Bränden in Gegenverkehrstunneln eine höhere Anzahl von eingeschlossenen Personen zu erwarten, so dass die Feuerwehr sich im Anfangsstadium ihres Einsatzes auf Rettungsmaßnahmen konzentrieren muss. Letzteres führt wiederum zu einem Anwachsen der Dimension des Brandes.

Tendenz zur Staubildung im Tunnel

Im Brandfall werden die Fluchtmöglichkeiten bei gleichzeitigem Verkehrsstau stark behindert. Weiterhin ist das Vordringen der Einsatzkräfte der Feuerwehr zum Brandherd signifikant eingeschränkt, was das Ausmaß des Brandes vergrößern kann.

Zeit zwischen Brandausbruch und Eingreifen der Feuerwehr

In Auswertung von Brandereignissen in Straßentunneln werden drei Zeitintervalle festgelegt:

- Innerhalb von 8 Minuten
- Zwischen 8 und 20 Minuten
- Mehr als 20 Minuten

In Abhängigkeit von den aufgelisteten Kriterien werden in der Arbeit [KIM 2010] vier Gruppen von Straßentunneln etabliert. Diese Gruppeneinteilung ist in der Tabelle 3.4 veranschaulicht. Zu den vier Gruppen von Straßentunneln werden neben den Klassen der Tunnelbrände insbesondere für die jeweilige Gruppe der Straßentunnel charakteristische Brandszenarien entsprechend Abbildung 3.3 zugeordnet. Der Abbildung 3.4 ist ein Fließschema zur Einstufung der Straßentunnel zu entnehmen.

Tabelle 3.4: Klassifizierung der Brände in Straßentunneln [KIM 2010]

Gruppe	Beschreibung	Zeit zwischen Brandausbruch und Eingreifen der Feuerwehr	Beispiele für Klassen der Tunnelbrände (s. Tabelle 3.3)	Beispiele für Brandszenarien (s. Abbildung 3.3)
Gruppe I	Das Passieren von LKW und Fahrzeugen mit Gefahrgut ist eingeschränkt	Die Feuerwehr ist in der Lage, Brände zu löschen, unabhängig von Eingreifzeit und Größe des Brandes	K1	A, a
Gruppe II	Richtungsverkehrstunnel – Eingreifzeit der Feuerwehr beträgt weniger als 8 Minuten oder stationäre Löschanlage ist installiert Alle Brände sind unter Kontrolle, entweder durch Feuerwehr oder durch stationäre Löschanlage	bis 8 Minuten	K1, K2, K3, K4	A, a, C, c
Gruppe III	Richtungsverkehrstunnel – Die Feuerwehr kann sich langsam entwickelnde Brände wie z.B. der Klasse 2 kontrollieren, so dass Brände der Klasse 1 resultieren	zwischen 8 Minuten und 20 Minuten	K1, K2	A, a, C, c
Gruppe IV	Gegenverkehrstunnel oder Verkehrsstau im Tunnel – Das Risiko für das Entstehen von Kollisionsbränden und von Feuerübersprüngen ist signifikant hoch	mehr als 20 Minuten	K2, K4	B, D

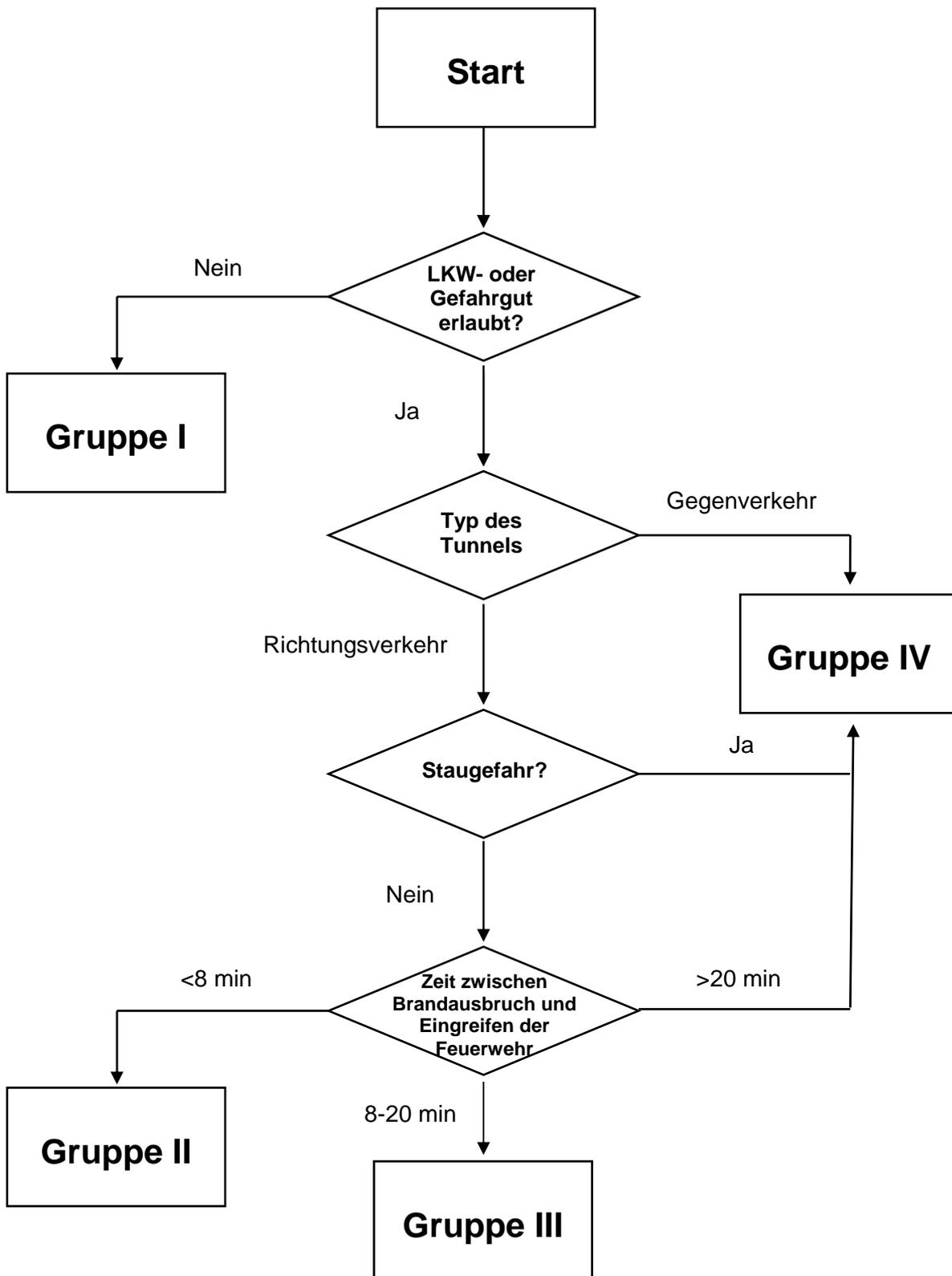


Abbildung 3.4: Fließschema zur Einstufung der Straßentunnel entsprechend des Verfahrens von Kim u. a. [KIM 2010]

3.4 Schlussfolgerungen für die mobile Bekämpfung von Tunnelbränden

Die Einsatzkräfte einer Freiwilligen Feuerwehr werden im ländlichen Bereich in der Regel frühestens nach 10 Minuten bis 20 Minuten am Tunnelportal eintreffen. Diese Zeiten liegen im städtischen Bereich bei einer Berufsfeuerwehr sicher deutlich unter 10 Minuten. Befindet sich in unmittelbarer Nähe des Tunnelportals eine Feuerwache, so kann ein Feuerwehrfahrzeug nach 2 Minuten bis 3 Minuten am Tunnelportal verfügbar sein. Kommt es nun im Tunnel zu einem Brandereignis und liegt der Ereignisort einige Kilometer vom Portal entfernt, so kann eine Feuerwehr unter Umständen erst nach 10 Minuten oder noch deutlich später tätig werden, wobei diese Zeit vom Tunnelportal aus gerechnet ist.

Fährt wie beim Brand des Mont Blanc-Tunnels ein mit Lebensmitteln beladener LKW (9 Tonnen Margarine und 12 Tonnen Mehl) in einen Tunnel ein und kommt es einige Kilometer vom Portal entfernt zu einem vergleichbaren Unfall mit Brandfolge, so kann auch zukünftig ein ähnliches Szenario eintreten.

Eine deutliche Konsequenzminderung kann durch eine leistungsfähige Rauchabzugsanlage erreicht werden. Es ist möglich, nach vollem Anlaufen der Absaugung weite Bereiche des Tunnels rauchfrei zu halten. In der näheren Umgebung des Brandes wird dies nur begrenzt möglich sein. Wie groß der verrauchte Abschnitt ist, hängt u. a. von der Brandgröße und der technischen Ausführung der Absaugung ab. Eine installierte Rauchabzugsanlage ist jedoch noch kein Garant für mehr Sicherheit im Brandfall. Beim Mont-Blanc-Tunnel war eine derartige Anlage installiert, aber ein nicht abgestimmtes Handeln verhinderte die erhoffte Konsequenzminderung. Neben der technischen Installation einer Rauchabzugsanlage ist darüber hinaus zu sichern, dass im Brandfall unbedingt ein koordiniertes Vorgehen zwischen den Betreibern der Betriebstechnik und der Feuerwehr gesichert ist. Das muss intensiv trainiert werden. Beim Brand im St. Gotthard-Tunnel 2001 wurden Konsequenz mindernde Effekte erzielt.

Eine wesentliche Verbesserung kann durch eine stationäre Brandbekämpfungsanlage erreicht werden. Diese kann deutlich vor Eintreffen der Feuerwehr aktiv werden, den Brand begrenzen und den Feuerwehrrangriff auch am Brandort ermöglichen. Vor allem wird auch die Möglichkeit der Selbstrettung verbessert. Derartige Anlagen sind bereits installiert. Eingesetzt werden u.a. Wassernebeltechnologien oder auf Schaum basierende Verfahren. Von deutschen Herstellern werden zwei Systeme angeboten, die auf diesen Technologien basieren.

Eine Hochdruckwassernebelbrandbekämpfungsanlage wurde im Rahmen geförderter Projekte SOLIT und SOLIT² (Safety of Life in Tunnels) entwickelt und getestet (s. [STARKE 2010]). Im Ausland ist dieses System in einigen Tunneln bereits installiert [FOGTEC].

One Seven ist ein auf Druckluftschäum basierendes System. Dieses System wird gegenwärtig in Deutschland ein zweites Mal installiert. Eine Beschreibung der Technologie sowie eine Referenzliste sind bei [ONE SEVEN] zu finden.

Generell bleibt festzustellen, dass es für die Tunnelsicherheit keine universell gültige Lösung gibt. Ausgangspunkt muss immer eine auf den konkreten Tunnel bezogene Risikobetrachtung sein, die ausgehend von der Nutzung, der Verfügbarkeit der Feuerwehr und vielen anderen Einflussfaktoren ein Sicherheitskonzept entwickelt.

Wird die Installation einer Brandbekämpfungsanlage erwogen, so ist auch die Frage des Gefahrguttransportes durch Tunnel zu überdenken. Dieser Aspekt wird im Teil II der vorliegenden Arbeit beleuchtet.

TEIL II

4 EINLEITUNG

Die Beförderung von gefährlichen Stoffen auf der Straße ist international durch das europäische Übereinkommen ADR geregelt. Mit der Novelle 2007 des ADR wurde die Grundlage für eine einheitliche, europäische Regelung für Beschränkungen von Gefahrguttransporten durch Straßentunnel geschaffen [ADR 2007]. Kernstück bildet die Festlegung der Tunnelkategorien A bis E entsprechend möglicher Konsequenzen der jeweils zugelassenen Gefahrguttransporte. Auf Basis einer risikobasierten Kategorisierung der Tunnelanlagen besteht die Möglichkeit, differenziert nach Gefahrgutgruppen, Durchfahrtsverbote zu erlassen.

Die folgenden Wirkungsarten von Gefahrguttransporten sind unter dem Aspekt des Risikos für die Tunnelnutzer zu berücksichtigen: Explosions-/Druckwirkung, Toxizität, Brandwirkung. Verschiedene im ADR enthaltene Angaben gestatten, die von transportierten Gefahrstoffen ausgehenden möglichen Wirkungen einzuschätzen.

Alle im ADR beinhalteten Gefahrgüter sind Angehörige einer bestimmten Gefahrgutklasse. Weiterhin werden die von einem Gefahrgut ausgehenden Haupt- und Nebengefahren durch die sogenannte Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr, früher Kemler-Zahl, zum Ausdruck gebracht. Diese kann aus der Stoffliste des ADR, Kapitel 3 Spalte 20 entnommen werden. Bei der Beförderung von Gefahrgut ist sie über der UN-Nummer auf der orangenen Tafel anzugeben, die am Fahrzeug anzubringen ist. Damit stellt sie bei einem Gefahrgutunfall eine wichtige Informationsquelle für die Ersteinsatzkräfte der Feuerwehr dar. Vor diesem Hintergrund soll in dieser Arbeit betrachtet werden, wie sich die Wirkungen von Gefahrgütern, die die Durchfahrtbeschränkung für bestimmte Tunnelkategorien begründen, in den entsprechenden Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr abbilden. Diese Analyse soll weiterhin die Risiken aufzeigen, die für die Tunnelkategorien gegeben sind, für die die jeweilige Durchfahrtbeschränkung nicht gilt. Weiterhin wird in die Untersuchungen für eine Reihe von Gefahrstoffen der Gefahrendiamant einbezogen, der in einem Stufensystem für Gesundheits-, Brand- und Reaktionsgefahr eines Stoffes zur Verfügung stellt. Im Rahmen der Erstbeurteilung einer Gefahrenlage hat der Gefahrendiamant in den Reihen der Feuerwehr eine starke Verbreitung gefunden.

Mit Hilfe von statistischen Erhebungen können die Gefahrstoffklassen ermittelt werden, die den Hauptanteil an der Gesamtmenge der transportierten Gefahrgüter in Deutschland reprä-

sentieren. Für diese Gefahrstoffklassen wird geprüft werden, in Tunneln welcher Kategorie Durchfahrtbeschränkungen bestehen bzw. in Tunneln welcher Kategorie potenziell die Wirkungen der Angehörigen dieser Gefahrstoffklassen in Gefahrenabwehrplänen berücksichtigt werden müssen. Diese Betrachtungsweise wird zusätzlich auf die Gefahrstoffklasse 4.3 (Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase entwickeln) und die Gefahrstoffklasse 5.1 (Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe) angewandt werden.

Diesen Erläuterungen vorangestellt werden jeweils eine kurze Vorstellung der im ADR auftretenden Gefahrstoffklassen sowie des Gefahrendiamanten und statistische Informationen zu transportierten Gefahrgütern in Deutschland.

5 GRUNDLAGEN

5.1 Kriterien der Tunnelkategorisierung

Die Beschränkungen, die sich aus den verschiedenen Tunnelkategorien im Rahmen der bereits oben erwähnten Novelle 2007 des ADR ergeben, sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Die Kategorie A bedeutet, dass keine Beschränkungen für gefährliche Güter bestehen. Bis zur Kategorie E, in der fast alle Transporte mit gefährlichen Gütern den Tunnel nicht passieren dürfen, werden in den Kategorien B bis D Einschränkungen vorgenommen.

Tabelle 5.1: Kriterien der Tunnelkategorisierung

Tunnel-kategorie	Erklärung
A	Keine Beschränkung für gefährliche Güter Ausnahmen können für folgende Stoffe von den zuständigen Behörden abweichend geregelt werden: UN 2919 Radioaktive Stoffe unter Sondervereinbarung UN 3331 Radioaktive Stoffe, spaltbar, unter Sondervereinbarung
B	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer <ul style="list-style-type: none"> • sehr großen Explosion führen können
C	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr großen Explosion („B“-Güter) oder • großen Explosion oder • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe führen können
D	Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> • sehr großen Explosion („B“-Güter) oder • großen Explosion („C“-Güter) oder • umfangreichen Freiwerden giftiger Stoffe („C“-Güter) oder • großen Brand führen können
E	Beschränkungen für alle gefährlichen Güter mit Ausnahme der UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373

Im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) initiierten Forschungsprojektes wurde ein Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln in Deutschland entwickelt, das Risikoszenarien enthält, die Unfälle beim Transport von Gefahrgütern mit den Folgen Explosions-/Druckwirkung, Toxizität und Brandwirkung beschreiben [BASt 2009]. Dieses Verfahren ist eng an das auf europäischer Ebene angewandte OECD/PIARC-Modell angelehnt. In dem in Deutschland etablierten Verfahren zur Tunnelkategorisierung werden die vier Leitstoffe Benzin, Propan, Chlor und Trinitrotoluol (TNT) zur Präsentation der maßgeblichen Gefahrenwirkungen herangezogen. Die Modellierung der Gefahrgutwirkungen und die Ermittlung der Schadensausmaße werden ausschließlich auf diese Leitstoffe abgestützt. Die Leitstoffe und die entsprechenden Ausbreitungs- und Wirkungsarten werden in der Tabelle 5.2 dargestellt. Die gewählten Leitstoffe weichen etwas von den im OECD/PIARC-Modell berücksichtigten Leitstoffen ab. Im OECD/PIARC-Modell bilden die toxische Wirkung Acrolein, Ammoniak, Chlor. Im Unterschied hierzu wird in dem für Deutschland gültigen Modell die toxische Wirkung unter dem Leitstoff Chlor zusammengefasst. Weiterhin werden Druckwirkungen infolge Explosion nicht mit CO₂, sondern mit dem Sprengstoff TNT beschrieben.

Zur Ergänzung soll angeführt werden, dass In Schweden als Leitstoffe für vergleichbare Risikoanalysen andere Gefahrgüter mit großen Schadensauswirkungen gewählt werden, wie zum Beispiel LPG als Leitstoff für entzündliche Gase, Ammoniak oder Schwefeldioxid für toxische Gase, Dieselkraftstoff in umweltgefährdeten Gebieten.

Tabelle 5.2: Übersicht der Risikoszenarien im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln in Deutschland [BAST 2009]

Leitstoff	Freisetzungsort	Freige-setzte Menge	Berücksichtigte Ausbreitungs- und Wirkungsarten	Abgebildete Hauptgefahr gemäß ADR
Benzin	Tanktransport; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 20 m ³	15 t	<ul style="list-style-type: none"> • Sofortige Zündung und Lachenbrand • Lachenbildung und verzögerte Zündung • Rauchgasausbreitung 	große Brandgefahr
	Transport in Kleingebinden; spontane oder kontinuierliche Freisetzung von rund 10 m ³	8 t	<ul style="list-style-type: none"> • Sofortige Zündung und Lachenbrand • Lachenbildung und verzögerte Zündung • Rauchgasausbreitung 	-
Propan	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
	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
Chlor	Tanktransport; spontane Freisetzung von 4t	4 t	<ul style="list-style-type: none"> • Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen 	Freisetzung giftiger Stoffe
	Transport in Kleingebinden (Gesamtmenge <50kg), spontane oder kontinuierliche Freisetzung	50 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Schwergasausbreitung und humantoxische Wirkungen 	-
TNT	Transport von 1.000 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	1 t	<ul style="list-style-type: none"> • Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte) 	sehr große Explosionsgefahr
	Transport von 1.000 kg TNT-Äquivalent. Nach einem Unfall gerät das Transportfahrzeug in Brand, durch den eine Explosion ausgelöst wird.	100 kg	<ul style="list-style-type: none"> • Verzögerte Zündung und Detonation (sowie mögliche Verdämmungseffekte) 	große Explosionsgefahr

Die in der Tabelle 5.2 aufgelisteten Szenarien für Gefahrgutfreisetzen und Folgewirkungen stellen in konkreten chemischen Lagen für die Einsatzkräfte der Feuerwehr nur eine sehr eingeschränkte Möglichkeit der angepassten Informationsgewinnung dar.

5.2 Der Tunnelbeschränkungscode

Die Zuordnung der nach ADR geregelten Gefahrgüter zu den einzelnen Tunnelkategorien wird im sogenannten Tunnelbeschränkungscode (TBC) abgebildet. Jede im ADR enthaltene UN-Nummer wird mit einem Tunnelbeschränkungscode klassifiziert. Dieser ist in der Stoffliste des ADR in Kapitel 3, Spalte 15 verzeichnet und ist in den Beförderungspapieren anzugeben. Der Eintrag muss nicht erfolgen, wenn vorher bekannt ist, dass kein Tunnel durchfahren wird, oder wenn im Rahmen von Freistellungen nach ADR 1.1.3.6 transportiert wird.

Die Tabelle 5.3 gibt einen Ausschnitt der Stoffliste des ADR wieder mit der Angabe des Tunnelbeschränkungscode für drei ausgewählte Stoffe.

Tabelle 5.3: Ausschnitt aus der Stoffliste des ADR mit Angabe des Tunnelbeschränkungscode

Beförderungskategorie (Tunnelbeschränkungscode)	Sondervorschriften für die Beförderung				Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr	UN-Nummer	Name und Beschreibung
	Versandstücke	lose Schüttung	Be- und Entladung, Handhabung	Betrieb			
1.1.3.6	7.2.4	7.3.3	7.5.11	8.5	5.3.2.3		3.1.2
(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(1)	(2)
3 (E)	V12				80	1789	CHLORWASSERSTOFF-SÄURE
1 (C/D)			CV13 CV28	S14	886	1790	FLUORWASSERSTOFF-SÄURE mit mehr als 85 % Fluorwasserstoff
2 (E)			CV13 CV28		86	1790	FLUORWASSERSTOFF-SÄURE mit höchstens 60 % Fluorwasserstoff

Die Beschränkungen, die aus der Einstufung eines Gefahrgutes für dessen Beförderung durch Tunnel resultieren, werden in der Abbildung 5.2 zusammenfassend veranschaulicht.

Tabelle 5.4: Zusammenhang zwischen Tunnelbeschränkungscode der Gefahrgüter und Beförderungsmöglichkeit durch Tunnel der verschiedenen Kategorien

Tunnelkategorie	A	B	C	D	E
Gefahrgut mit Beschränkungscode					
B	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten
B 1000 C (Klasse 1)	erlaubt	*1	verboten	verboten	verboten
B / D	erlaubt	*2	*2	verboten	verboten
B / E	erlaubt	*2	*2	*2	verboten
C	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten
C 5000 D (Klasse 1)	erlaubt	erlaubt	*3	verboten	verboten
C / D	erlaubt	erlaubt	*2	verboten	verboten
C / E	erlaubt	erlaubt	*2	*2	verboten
D	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten
D / E	erlaubt	erlaubt	erlaubt	*4	verboten
E	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten

Zeichenerklärung:

*1 erlaubt, wenn die Nettoexplosivmasse 1000 kg nicht überschreitet
verboten, wenn die Nettoexplosivmasse 1000 kg überschreitet

*2 erlaubt, wenn Beförderung als Stückgut
verboten, wenn Beförderung in Tanks

*3 erlaubt, wenn die Nettoexplosivmasse 5000 kg nicht überschreitet
verboten, wenn die Nettoexplosivmasse 5000 kg überschreitet

*4 erlaubt, wenn Beförderung als Stückgut
verboten, wenn Beförderung in Tanks oder als lose Schüttung

Die Interpretation der Tabelle soll an zwei Beispielen demonstriert werden:

- Benzin (UN 1203) hat den Tunnelbeschränkungscode D / E. Bei Beförderung in Tanks ist daher das Passieren der Tunnel der Kategorien D und E verboten. Bei Beförderung als Stückgut ist das Durchfahren von Tunneln der Kategorie E nicht gestattet.
- Trichlorsilan (UN 1295) ist der Tunnelbeschränkungscode B / E zugewiesen worden. Trichlorsilan darf damit bei Tanktransport nicht die Tunnel der Kategorien B, C, D und E passieren. Bei Beförderung als Stückgut ist das Durchfahren von Tunneln der Kategorie E nicht gestattet.

5.3 Die Gefahrstoffklassen im ADR und die Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr mit Erläuterungen

Der ADR ordnet jeden Gefahrstoff in eine Gefahrstoffklasse ein. Weiterhin wird jedem Gefahrstoff eine Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr zugewiesen, die die Haupt- und Nebengefahren dieses Stoffes beschreibt.

Im ADR gibt es folgende *Klassen gefährlicher Güter*:

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

Die *Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr* besteht für Stoffe der Klassen 2 bis 9 aus zwei oder drei Ziffern.

Die Ziffern weisen im Allgemeinen auf folgende Gefahren hin:

2	Entweichen von Gas durch Druck oder durch chemische Reaktion
3	Entzündbarkeit von flüssigen Stoffen (Dämpfen) und Gasen oder selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff
4	Entzündbarkeit von festen Stoffen oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff
5	Oxidierende (brandfördernde) Wirkung
6	Giftigkeit oder Ansteckungsgefahr
7	Radioaktivität
8	Ätzwirkung
9	Gefahr einer spontanen heftigen Reaktion

Die Verdoppelung einer Ziffer weist auf die Zunahme der entsprechenden Gefahr hin.

Wenn die Gefahr eines Stoffes ausreichend durch eine einzige Ziffer angegeben werden kann, wird dieser Ziffer eine Null angefügt.

Folgende Ziffernkombinationen haben jedoch eine besondere Bedeutung: 22, 323, 333, 362, 382, 423, 44, 446, 462, 482, 539, 606, 623, 642, 823, 842, 90 und 99.

Wenn der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr der Buchstabe «X» vorangestellt ist, bedeutet dies, dass der Stoff in gefährlicher Weise mit Wasser reagiert. Bei solchen Stoffen darf Wasser nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.

Für die Stoffe der Klasse 1 wird als Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr der Klassifizierungscode gemäß

Kapitel 3.2 Tabelle A Spalte 3b verwendet. Der Klassifizierungscode besteht aus:

- der Nummer der Unterklasse nach Absatz 2.2.1.1.5 und
- dem Buchstaben der Verträglichkeitsgruppe nach Absatz 2.2.1.1.6.

Die Bedeutung der in Kapitel 3.2 Tabelle A Spalte 20 der Stoffliste des ADR aufgeführten Nummern zur Kennzeichnung ist in den Anlagen zu dieser Arbeit enthalten.

5.4 Der Gefahrendiamant

Der Gefahrendiamant (von englisch: hazard diamond) ist ein System für Einsatzkräfte zur sehr schnellen Beurteilung der Gefahren, die bei Unfällen mit gefährlichen Gütern auftreten. Das Gefahrensymbol besitzt die Form eines auf die Spitze gestellten Quadrats (siehe Abbildung 5.1). Dieses NFPA 704 Hazard Identification System wurde von der amerikanischen NFPA (National Fire Protection Association) entwickelt und ordnet gefährlichen Stoffen für die Gebiete Gesundheits-, Brand- und Reaktionsgefahr einen Grad von 0 bis 4 zu (aufsteigendes Gefährdungspotential).

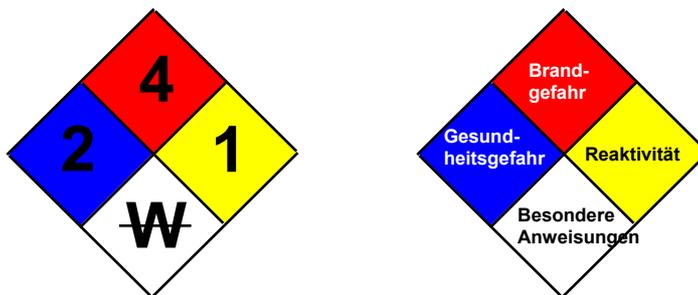


Abbildung 5.1: Gefahrendiamant

links: beispielhafte Darstellung, rechts: Erläuterung der Felder

Die Kriterien für die jeweiligen Einstufungen und die daraus resultierenden Kurzinformationen für die Einsatzkräfte können dem Anhang zu dieser Arbeit entnommen werden.

5.5 Informationen zur Gesamtmenge an transportierten Gefahrgütern in Deutschland

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland auf Straßen, Schienen und Wasserwegen rund 307 Millionen Tonnen Gefahrgüter transportiert. Die Verteilung der Gesamtmenge der

transportierten Gefahrgüter auf die einzelnen Verkehrsträger wird in der Abbildung 5.2 veranschaulicht. Weiterhin sind in der Abbildung 5.2 die Angaben für die jeweiligen Gütertransportmengen insgesamt enthalten. Die Daten sind einer Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes entnommen [DESTATIS 2012]. Die aufgeführten Werte für den Straßengüterverkehr gelten für deutsche und ausländische EU-Fahrzeuge (mit Kroatien, Liechtenstein, Norwegen und Schweiz), ohne Durchgangsverkehr. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass Straßengüterfahrzeuge mit 140 Millionen Tonnen bzw. ca. 46% den Hauptanteil der Gefahrgüter befördern, gefolgt von der Eisenbahn und dem Seeverkehr.

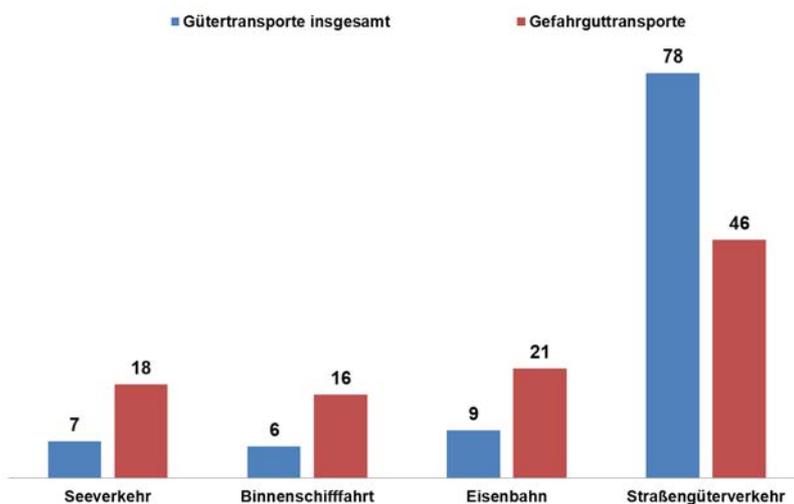


Abbildung 5.2: Anteile der Verkehrsträger an der Beförderungsmenge 2010 in % [DESTATIS 2012]

Die Tabelle 5.5 und die Abbildung 5.3 zeigen den Anteil der Gefahrklasse 2 (Gase), 3 (Entzündbare flüssige Stoffe) und 8 (Ätzende Stoffe) am Gefahrgutaufkommen der einzelnen Verkehrsträger. Diese drei Gefahrgutklassen erreichen eine Beförderungsmenge von mindestens 20 Millionen Tonnen.

Tabelle 5.5: Gefahrguttransporte nach Verkehrsträgern und ausgewählten Gefahrklassen [DESTATIS 2012]

	Seeverkehr	Binnenschiff- fahrt	Eisenbahn	Straßengüter- verkehr	insgesamt
in 1000 Tonnen					
Gesamttransportmenge	56340	47794	63156	140002	307292
davon Klasse					
2 Gase	2098	3444	6644	14162	26348
3 Entzündbare flüssige Stoffe	46130	37181	39212	89951	212474
8 Ätzende Stoffe	1932	1443	5255	12582	21212

Im Rahmen der Gefahrguttransporte in Deutschland kommt der Gefahrklasse 3 „Entzündbare flüssige Stoffe“ die höchste Bedeutung zu. Dazu zählen beispielsweise rohes Erdöl oder Kraftstoffe. 212 Millionen Tonnen Güter dieser Gefahrklasse wurden 2010 auf

Straßen, Schienen und Wasserwegen transportiert (siehe Tabelle 5.5). Das entspricht 69 % der gesamten Gefahrgutmenge. Hiervon entfiel wiederum mit 90 Millionen Tonnen „Entzündbare flüssige Stoffe“ der Hauptanteil auf den Verkehrsträger Straße. Gase (Gefahrklasse 2) stellten mit 26 Millionen Tonnen beziehungsweise einem Anteil von 10 % die zweitwichtigste Gefahrklasse im deutschen Güterverkehr dar.

Bei getrennter Analyse jedes Verkehrsträgers wird ebenfalls das Ergebnis erhalten, dass die Gefahrklasse 3 „Entzündbare flüssige Stoffe“ die dominierende Rolle spielt (siehe Abbildung 5.3).

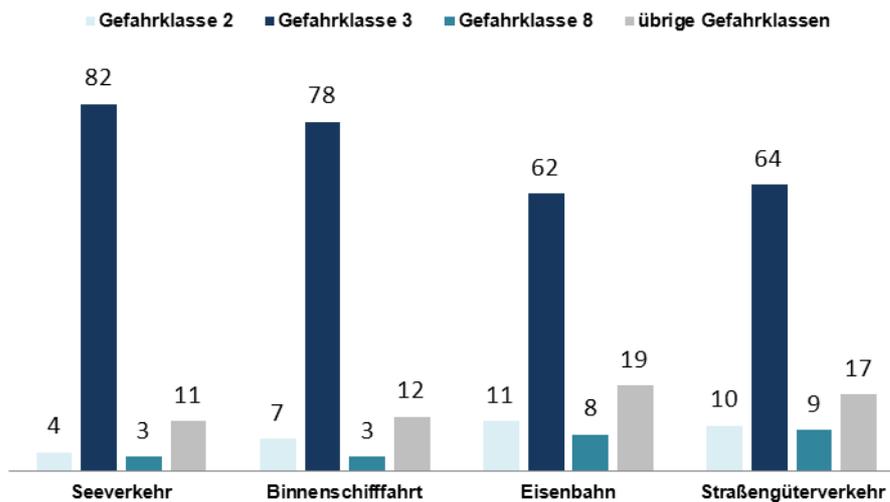


Abbildung 5.3: Anteile ausgewählter Gefahrklassen an den Gefahrguttransporten nach Verkehrsträgern in % [DESTATIS 2012]

Im Bericht des Statistischen Bundesamtes sind für den Güterstraßentransport detaillierte Informationen zur Verteilung der Transportmengen auf die Gesamtheit der Gefahrstoffklassen verfügbar. Berücksichtigt werden in dieser Statistik deutsche Fahrzeuge ohne Durchgangsverkehr. Diese Daten sind in der Tabelle 5.6 für das Jahr 2010 zusammengefasst.

Table 5.6: Gesamttransportmenge und Gefahrguttransport 2010 – Straßengütertransport mit deutschen Fahrzeugen ohne Durchgangsverkehr [DESTATIS 2012]

	Insgesamt	Binnenverkehr	Grenzüberschreitender Verkehr	
			Versand	Empfang
in 1000 Tonnen				
Gesamttransportmenge	2714786	2594703	67902	52182
darunter Gefahrgut insgesamt	127555	121121	3263	3171
davon Klasse				
1 Explosive Stoffe und Gegenstände mit Explosivstoff	700	648	23	29
2 Gase	12714	11147	861	707
3 Entzündbare flüssige Stoffe	84034	82476	799	759
4.1 Entzündbare feste Stoffe	3858	3567	200	91
4.2 Selbstentzündliche Stoffe	1142	992	75	76
4.3 Stoffe, die mit Wasser entzündliche Gase entwickeln	2116	1964	76	76
5.1 Entzündend (oxidierend) wirkende Stoffe	6338	5808	147	384
5.2 Organische Peroxide	24	21	2	1
6.1 Giftige Stoffe	2763	2389	196	178
6.2 Ansteckungsgefährliche Stoffe	16	14	1	1
8 Ätzende Stoffe	10480	8994	763	724
9 Verschiedene gefährliche Stoffe und Gegenstände	3370	3102	120	148

5.6 Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr

Vom Statistischen Bundesamt wird jährlich ein Bericht zu „Unfällen von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr“ veröffentlicht. Grundlage für diese Veröffentlichung ist die Straßenverkehrsunfallstatistik auf Basis des Gesetzes über die Statistik der Straßenverkehrsunfälle (StVUnfStatG). Die erfassten Gefahrgutunfälle unterliegen jedoch einschränkenden Kriterien. Einerseits werden nur von der Polizei aufgenommene Straßenverkehrsunfälle berücksichtigt. Weiterhin gehen nur Unfälle mit Personenschaden, d.h. Unfälle, bei denen unabhängig von der Höhe des Sachschadens Personen verletzt oder getötet wurden schwerwiegende Unfälle mit Sachschaden – im engeren Sinne – in die Statistik ein. Innerhalb dieser genannten Kategorien werden die Gefahrgutunfälle gesondert ausgewiesen, bei denen zusätzlich ein Gefahrgutaustritt erfolgte.

Unfälle, bei denen zwar Gefahrgut ausgetreten, aber kein Personenschaden oder größerer Sachschaden entstanden ist, werden nicht erfasst. Die Erhebungskriterien für Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr unterscheiden sich auch von denen für die Ereignisberichte gemäß Abschnitt 1.8.5 ADR/RID.

Nach der Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes über Unfälle von Güterkraftfahrzeugen sind für 2008 insgesamt 314 Gefahrgutunfälle verzeichnet worden, wobei bei 8 Unfällen Gefahrgut austrat. Die Anzahl der Gefahrgutunfälle auf der Straße insgesamt lag in den Jahren 2004 bis 2008 jeweils zwischen 300 und 400.

Im Jahr 2008 wurden insgesamt über 9 Millionen Gefahrgutfahrten auf der Straße gezählt. Dabei wurden etwa 855 Millionen km zurückgelegt und über 127 Millionen Tonnen Gefahrgut innerhalb Deutschlands befördert. Ein Vergleich dieser Daten mit der vom Statistischen Bundesamt erfassten Anzahl der Unfälle bei der Beförderung auf der Straße, resultiert für das Jahr 2008 – wie auch für die Vorjahre – in einer sehr geringen Unfallhäufigkeit beim Gefahrguttransport auf der Straße. Bei dieser Betrachtung kann noch nicht von einem „Transportrisiko“ gesprochen werden, da das jeweilige Schadensausmaß der Unfälle hier unberücksichtigt bleibt. Das Risiko R wird im technisch-wissenschaftlichen Sinne durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben, die die zu erwartende Häufigkeit H des Eintritts eines zum Schaden führenden Ereignisses und das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß (Konsequenz K) als Produkt berücksichtigt: $R = H \cdot K$.

Das Risiko kann bei einem großen Schadensausmaß und geringer Häufigkeit demzufolge genauso groß sein, wie bei einem geringen Schadensausmaß und großer Häufigkeit.

6 DURCHFAHRTBESCHRÄNKUNGEN FÜR GEFAHRGÜTER DURCH TUNNEL VERSCHIEDENER KATEGORIEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER NUMMER ZUR KENNZEICHNUNG DER GEFAHR

6.1 Methodisches Vorgehen

Das Vorhaben, die Zuordnung der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr eines Stoffes aus der Stoffliste des ADR mit der Zuordnung dieses Stoffes zu einem Tunnelbeschränkungscode zu vergleichen, basiert auf der folgenden Überlegung:

Mit der Zuordnung der Stoffe zu den Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr wird eine Gruppierung der Gefahrstoffe vorgenommen in Abhängigkeit der von ihnen ausgehenden Haupt- bzw. Nebengefahren. Das Zuweisen der Tunnelbeschränkungscode zu den Gefahrstoffen bedeutet ebenfalls eine Gruppierung der Stoffe entsprechend der Novelle 2007 des ADR (vergleiche Tabelle 6.1). Die letztgenannte Gruppierung stellt jedoch eine sehr grobe Einstufung der Stoffe dar, die sich für die Ableitung von einsatztaktischen Maßnahmen der Feuerwehr nur eingeschränkt eignet. Es soll nun geprüft werden, inwieweit sich Analogien aufzeigen lassen zwischen diesen beiden Systematisierungen. Das heißt, konzentrieren sich bestimmte Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr auf eine bestimmte Tunnelkategorie oder gibt es andererseits Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr, die für eine Tunnelkategorie nicht existieren? Wenn derartige Zusammenhänge vorliegen, können die Feuerwehren, die einen Tunnel einer bestimmten Kategorie in ihrem Verantwortungsbereich haben, die Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr heranziehen, zum Beispiel zur Erstellung der Gefahrenabwehrpläne.

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass eine erhebliche Anzahl der im ADR gelisteten Stoffe über unterschiedliche Tunnelbeschränkungscode für den Tanktransport bzw. für den Stückguttransport verfügt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden nur die Regelungen für den Tanktransport betrachtet.

Tabelle 6.1: Ausschnitt aus der Stoffliste des ADR mit Angabe des Tunnelsbeschränkungscode und der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr

Beförderungskategorie (Tunnelsbeschränkungscode)	Sondervorschriften für die Beförderung				Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr	UN-Nummer	Name und Beschreibung
	Versandstücke	lose Schüttung	Be- und Entladung, Handhabung	Betrieb			
1.1.3.6	7.2.4	7.3.3	7.5.11	8.5	5.3.2.3		3.1.2
(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(1)	(2)
3 (E)	V12				80	1789	CHLORWASSERSTOFFSÄURE
C/D			CV13 CV28	S14	886	1790	FLUORWASSERSTOFFSÄURE mit mehr als 85 % Fluorwasserstoff
2 (E)			CV13 CV28		86	1790	FLUORWASSERSTOFFSÄURE mit höchstens 60 % Fluorwasserstoff

6.2 Zuordnung der Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr zu den Tunnelsbeschränkungscode für Tanktransport

Die Korrelation zwischen den Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr der Stoffe und den entsprechenden Tunnelsbeschränkungscode bildet ab, für welche Tunnelkategorien Durchfahrtbeschränkungen für die Stoffe bestehen, denen diese Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr zugewiesen wurde. Das bedeutet, es kann abgeleitet werden, welche Gefahrenpotentiale für eine gegebene Tunnelkategorie existieren.

In den nachfolgenden Tabellen 6.2 – 6.5 werden die Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr für folgende Gefahrenklassen veranschaulicht:

- Klasse 4.3 (Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase bilden)
- Klasse 2 (Gase)
- Klasse 3 (Entzündbare flüssige Stoffe)
- Klasse 8 (Ätzende Stoffe).

Diese Gefahrenklassen wurden ausgewählt, weil sie einerseits wesentliches Gefahrenpotential in sich bergen (Klasse 4.3) bzw. andererseits die Klassen darstellen, die die höchsten Beförderungsmengen erreichen.

Tabelle 6.2: Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter der Klasse 4.3 (Stoffe, die in Berührung mit Wasser entzündbare Gase bilden) durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr (Gefahrnummer) der Gefahrgüter (Tanktransport)

Tunnelkategorie	A	B	C	D	E	Stoffbeispiele
Gefahrnummer des Gefahrgutes						
Gefahrnummer 323: entzündbarer flüssiger Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	
Gefahrnummer X323: entzündbarer flüssiger Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	• UN 1389: ALKALIMETALLAMALGAM, FLÜSSIG
Gefahrnummer X338: leicht entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	• UN 1295: TRICHLORSILAN UN 2988: CHLORSILANE, MIT WASSER REAGIEREND, ENTZÜNDBAR, ÄTZEND, N.A.G.
Gefahrnummer 362: entzündbarer flüssiger Stoff, giftig, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	
Gefahrnummer X362: entzündbarer flüssiger Stoff, giftig, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	• UN 3130: MIT WASSER REAGIERENDER FLÜSSIGER STOFF, GIFTIG, N.A.G., Vp I
Gefahrnummer 382: entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet	erlaubt	*1	*1	*1	verboten	*1 nur UN 2965 mit TBC B/E
Gefahrnummer X382: entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	• UN 3129: MIT WASSER REAGIERENDER FLÜSSIGER STOFF, ÄTZEND, N.A.G. Vp I
Gefahrnummer 423: fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet, oder entzündbarer fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet, oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet	erlaubt	erlaubt	erlaubt	*2	verboten	*2 Durchfahrt für die meisten Gefahrgüter der jeweiligen Gefahrnummer erlaubt

Fortsetzung Tabelle 6.2

<p>Gefahrnummer X423: fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet, oder entzündbarer fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet, oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)</p>	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1402:CALCIUMCARBID Vp I UN 1415: LITHIUM
<p>Gefahrnummer 462: fester Stoff, giftig, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet</p>	erlaubt	erlaubt	erlaubt	*3	verboten	<p>*3 Durchfahrt für die meisten Gefahrgüter der jeweiligen Gefahrnummer erlaubt</p>
<p>Gefahrnummer 482: fester Stoff, ätzend, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet</p>	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	
<p>Gefahrnummer X482: fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und ätzende Gase bildet (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)</p>	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 3131: MIT WASSER REAGIERENDER FESTER STOFF, ÄTZEND, N.A.G., Vp I

Table 6.3: Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter der Klasse 2 (Gase) durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr (Gefahrnummer) der Gefahrgüter (Tanktransport)

Tunnelkategorie	A	B	C	D	E	Stoffbeispiele
Gefahrnummer des Gefahrgutes						
ohne Gefahrnummer	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	
Gefahrnummer 20: erstickendes Gas oder Gas, das keine Zusatzgefahr aufweist	erlaubt	erlaubt	*1	*1	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1013: KOHLENDIOXID (TBC: C/E) • UN 1002: LUFT, VERDICHET (DRUCKLUFT) (TBC: E) • UN 1066: STICKSTOFF, VERDICHET (TBC: E)
Gefahrnummer 22: tiefgekühlt verflüssigtes Gas, erstickend	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 2187: KOHLENDIOXID, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG
Gefahrnummer 223: tiefgekühlt verflüssigtes Gas, entzündbar	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1972: METHAN, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG oder ERDGAS, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG, mit hohem Methangehalt
Gefahrnummer 225: tiefgekühlt verflüssigtes Gas, oxidierend (brandfördernd)	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1003: LUFT, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG • UN 2201: DISTICKSTOFF-MONOXID, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG
Gefahrnummer 23: entzündbares Gas	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1965: KOHLENWASSERSTOFFGAS, GEMISCH, VERFLÜSSIGT, N.A.G. (Gemisch A, A 01, A 02, A 0, A 1, B 1, B 2, B oder C) • UN 1971: METHAN, VERDICHET oder ERDGAS, VERDICHET, mit hohem Methangehalt • UN 1978: PROPAN
Gefahrnummer 239: entzündbarer flüssiger Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1001: ACETYLEN, GELÖST • UN 1086: VINYLCHLORID, STABILISIERT

Fortsetzung Tabelle 6.3

Gefahrnummer 25: oxidierendes (brandförderndes) Gas	erlaubt	erlaubt	*2	*2	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1072: SAUERSTOFF, VERDICHTET (TBC: E)
Gefahrnummer 26: giftiges Gas	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1955: VERDICHTETES GAS, GIFTIG, N.A.G. • UN 3162: VERFLÜSSIGTES GAS, GIFTIG, N.A.G.
Gefahrnummer 263: giftiges Gas, entzündbar	erlaubt	verboten	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1016: KOHLENMONOXID, VERDICHTET • UN 1023: STADTGAS, VERDICHTET • UN 1053: SCHWEFEL-WASSERSTOFF • UN 1071: ÖLGAS, VERDICHTET
Gefahrnummer 265: giftiges Gas, oxidierend (brandfördernd)	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1017: CHLOR
Gefahrnummer 268: giftiges Gas, ätzend	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1005: AMMONIAK, WASSERFREI

*1, *2, *3 Durchfahrt teilweise für Gefahrgüter der jeweiligen Gefahrnummer erlaubt

Tabelle 6.4: Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter der Klasse 3 (Entzündbare flüssige Stoffe) durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr (Gefahrnummer) der Gefahrgüter (Tanktransport)

Tunnelkategorie	A	B	C	D	E	Stoffbeispiele
Gefahrnummer des Gefahrgutes						
Gefahrnummer 30: – entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C) oder – entzündbarer flüssiger Stoff oder fester Stoff in geschmolzenem Zustand mit einem Flammpunkt über 60 °C, auf oder über seinen Flammpunkt erwärmt, oder – selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff	erlaubt	erlaubt *1	erlaubt *1	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1202: DIESELKRAFTSTOFF, der Norm EN 590:2004 entsprechend, oder GASÖL oder HEIZÖL, LEICHT mit einem Flammpunkt gemäß EN 590:2004 • UN 1267: ROHERDÖL (Verpackungsgruppe III)
Gefahrnummer 33: leicht entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt unter 23 °C)	erlaubt	erlaubt *2	erlaubt *2	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1090: ACETON • UN 1203: BENZIN oder OTTOKRAFTSTOFF • UN 1268: ERDÖLDESTILLATE, N.A.G. oder ERDÖLPRODUKTE, N.A.G. (Verpackungsgruppe I)
Gefahrnummer 336: leicht entzündbarer flüssiger Stoff, giftig	erlaubt	erlaubt	*3	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1230: METHANOL • UN 2478: ISOCYANATE, ENTZÜNDBAR, GIFTIG, N.A.G. oder ISOCYANAT, LÖSUNG, ENTZÜNDBAR, GIFTIG, N.A.G.
Gefahrnummer 338: leicht entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend	erlaubt	erlaubt	*3	verboten	verboten	
Gefahrnummer X338: leicht entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1162: DIMETHYLDICHLORSILAN • UN 1250: METHYLTRICHLORSILAN
Gefahrnummer 339: leicht entzündbarer flüssiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1218: ISOPREN, STABILISIERT • UN 1301: VINYLACETAT, STABILISIERT • UN 1919: METHYLACRYLAT, STABILISIERT

Fortsetzung Tabelle 6.4

Gefahrnummer 36: entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), schwach giftig, oder selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff, giftig	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	
Gefahrnummer 38: entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), schwach ätzend, oder selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff, ätzend	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	
Gefahrnummer 39: entzündbarer flüssiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	

*1 verboten für UN-Nummer 2059, Verpackungsgruppe III

*2 verboten für UN-Nummer 2059, Verpackungsgruppen I und II

*3 nur verboten für Verpackungsgruppe I bei Klassifizierungscodes FC, FT1, FT2 und FTC

Tabelle 6.5: Durchfahrtbeschränkungen für Gefahrgüter der Klasse 8 (Ätzende Stoffe) durch Tunnel verschiedener Kategorien in Abhängigkeit von der Nummer zur Kennzeichnung der Gefahr (Gefahrnummer) der Gefahrgüter (Tanktransport)

Tunnelkategorie	A	B	C	D	E	Stoffbeispiele
Gefahrnummer des Gefahrgutes						
ohne Gefahrnummer					verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 2029: HYDRAZIN, WASSERFREI
Gefahrnummer 80: ätzender oder schwach ätzender Stoff	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1789: CHLORWASSERSTOFFSÄURE • UN 1796: NITRIERSÄUREMISCHUNG mit höchstens 50 % Salpetersäure • UN 1824: NATRIUMHYDROXIDLÖSUNG • UN 1830: SCHWEFELSÄURE mit mehr als 51 % Säure • UN 2031: SALPETERSÄURE, andere als rotrauchende, mit weniger als 65 % Säure • UN 2209: FORMALDEHYDLÖSUNG mit mindestens 25 % Formaldehyd • UN 2790: ESSIGSÄURE, LÖSUNG mit mindestens 50 Masse-% und höchstens 80 Masse-% Säure
Gefahrnummer X80: ätzender oder schwach ätzender Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	
Gefahrnummer 83: ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	1*	verboten	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1779: AMEISENSÄURE mit mehr als 85 Masse-% Säure (TBC: D/E)
Gefahrnummer X83: ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	

Fortsetzung Tabelle 6.5

Gefahrnummer 839: ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	• UN 2218: ACRYLSÄURE, STABILISIERT
Gefahrnummer X839: ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann und der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	
Gefahrnummer 84: ätzender fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	
Gefahrnummer 85: ätzender oder schwach ätzender Stoff, oxidierend (brandfördernd)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	• UN 1802: PERCHLORSÄURE mit höchstens 50 Masse-% Säure
Gefahrnummer 856: ätzender oder schwach ätzender Stoff, oxidierend (brandfördernd) und giftig	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	verboten	• UN 2032: SALPETERSÄURE, ROTRAUCHEND
Gefahrnummer 86 ätzender oder schwach ätzender Stoff, giftig	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	• UN 2030: HYDRAZIN, WÄSSERIGE LÖSUNG mit mehr als 37 Masse-% Hydrazin (Verpackungsgruppen II und III)
Gefahrnummer 88: stark ätzender Stoff	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	• UN 2240: CHROM-SCHWEFELSÄURE
Gefahrnummer X88: stark ätzender Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	• UN 1836: THIONYLCHLORID
Gefahrnummer 883: stark ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C)	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	verboten	
Gefahrnummer 884: stark ätzender fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig	erlaubt	erlaubt	erlaubt	erlaubt	verboten	

Fortsetzung Tabelle 6.5

<p>Gefahrnummer 886: stark ätzender Stoff, giftig</p>	<p>erlaubt</p>	<p>erlaubt</p>	<p>verboten</p>	<p>verboten</p>	<p>verboten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1052: FLUORWASSERSTOFF, WASSERFREI • UN 1790: FLUORWASSERSTOFFSÄURE mit mehr als 85 % Fluorwasserstoff
<p>Gefahrnummer X886: stark ätzender Stoff, giftig, der mit Wasser gefährlich reagiert (Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden.)</p>	<p>erlaubt</p>	<p>erlaubt</p>	<p>verboten</p>	<p>verboten</p>	<p>verboten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • UN 1831: SCHWEFELSÄURE, RAUCHEND

***1 Durchfahrt für die meisten Gefahrgüter der jeweiligen Gefahrnummer erlaubt**

6.3 Schlussfolgerungen für Gefahrguttransport in Tunneln für Tanktransport

- Die Zuordnung der Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr zu den Tunnelbeschränkungscode des ADR zeigt, dass signifikante Gefährdungsmerkmale mit bestimmten Tunnelkategorien korrelieren. Dieses ist von wesentlicher Bedeutung für die Feuerwehren, die in Gefahrenabwehrpläne von Tunneln eingebunden sind.
- Die Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Stoffe, die bei Kontakt mit Wasser entzündbare Gase bilden und daher ein besonderes Gefahrenpotential in sich tragen (Klasse 4.3), für den Tanktransport mit dem Tunnelbeschränkungscode B belegt sind und daher die Beförderung durch Tunnel der Kategorien B bis E verboten ist. Damit wird ein Argument, das gegen den Einbau von stationären Löschanlagen in Tunneln der Kategorien B bis E spricht, entkräftet. Löschangriffe der Einsatzkräfte der Feuerwehr werden in Tunneln durch stationäre Löschanlagen effektiv unterstützt oder bei Großbränden überhaupt erst ermöglicht.
- Straßentunnel der Kategorien A, B und C sind für die Durchfahrt von Stoffen der Gefahrgruppe 3 („Entzündbare flüssige Stoffe“) freigegeben. Die Art der stationären Löschanlage muss an diese konkreten Bedingungen angepasst werden.
- Eine Einstufung von Tunneln in die Kategorie C gewährleistet den Tanktransport von Stoffen der Gefahrklasse 3, die den größten Anteil am Gesamtaufkommen an beförderten Gefahrgütern auf der Straße repräsentiert.

LITERATUR

[ADR 2007]: Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, 1. Januar 2007

[ASTRA 2012]: Bundesamt für Strassen (ASTRA), Gotthard-Strassentunnel – 10 Jahre nach dem Brand,

<http://www.astra.admin.ch/themen/nationalstrassen/04656/04669/index.html?lang=de>

recherchiert am 31.01.2012

[BADINO 2002]: J. P. Badino, J. G. Colonel, J. Petitpoisson, „Incendie du tunnel du Mont-Blanc du 24 mars 1999“, CTIF-Symposium Europäische Konferenz für mehr Tunnelsicherheit „Sind Tunnels sicher genug?“, 8.11.2002 Regensdorf/Schweiz

[BAM 2012]: www.tes.bam.de/de/regelwerke/tunnelvorschriften/index.htm

recherchiert 16.01.2012

[BANDMANN 2003]: M. Bandmann, „Sicherheitsfragen beim Bau und Betrieb von Verkehrstunneln“, 1. Konferenz des „European Forum on Underground Construction“, 02.06.2003, Suderburg

[BAST 2009]: Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007, FE 03.0437/2007 FRB, FE 86.0050/2008, www.bast.de

[BETTELINI 2003]: M. Bettelini, H. Neuenschwander, A. Henke, M. Gagliardi, W. Steiner, „The Fire in the St Gotthard Tunnel of October 24, 2001“, International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, Sweden, November 20-21, 2003

[BETTELINI 2003a]: M. Bettelini, „Frischer Wind im Tunnel – Grundlagen und aktuelle Entwicklungen für die Lüftung von Strassentunnels“, tec21, Nr.48/2003, Zürich 2003

[CARVEL 2004]: R. O. Carvel, Fire Size in Tunnels, Thesis, Heriot-Watt University Edinburgh, 2004

[CROSS-HARBOUR]: recherchiert am 30.01.2012, Fundstelle:
http://en.wikipedia.org/wiki/Cross-Harbour_Tunnel

[DESTATIS 2012]: Statistisches Bundesamt, DESTATIS, Fachserie 8 / Reihe 1.4, Verkehr, Gefahrguttransporte 2010, 06.11.2012

[DRYSDALE 1992]: D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons, 1992

[DUFFÉ 1999]: P. Duffé, M. Marec, Report on the Technical Enquiry into the Fire on 24 March 1999 in the Mont Blanc Tunnel, 30 June 1999

[EGGER 2002]: W. Egger, Referat auf CTIF-Symposium Europäische Konferenz für mehr Tunnelsicherheit „Sind Tunnels sicher genug?“, 8.11.2002 Regensburg/Schweiz

[EUREKA 1995]: „Fires in Transport Tunnels: Report on Full-Scale Tests“, EUREKA-Projekt EU 499:FIRETUN, herausgegeben von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V. , Düsseldorf, 1995

[FALCONNAT 2000]: B. Falconnat, „Der Brand im Mont Blanc Tunnel“ in „Brandschutz in Verkehrstunneln“ Schlussbericht, STUVA/STUFAtec GmbH, Dezember 2000

[FEHR 2002]: P. Fehr, „Sicht Ersteinsatzkräfte am Beispiel Ereignis Gotthard 24.01.2001“, CTIF-Symposium Europäische Konferenz für mehr Tunnelsicherheit „Sind Tunnels sicher genug?“, 8.11.2002 Regensburg/Schweiz

[FELDGES 2010]: M. Feldges, „Automatische Gefahrguterfassung vor Tunneln auf Basis von Laser-Scanner-Technologie – Erfahrungen aus dem Regelbetrieb A 99 Tunnel Allach“, Vortrag bei VSVI Schleswig-Holstein, Rendsburg, 23.02.2010

[FISCHER 2011]: S. Fischer, „Das UVA-Konzept der Berufsfeuerwehr Stuttgart“, Vortrag auf Fachkongress „Gefahrenabwehr in UVA“, 15.10.2011, Erfurt

[FOGTEC]: recherchiert am 30.10.2013, Fundstelle:
http://www.fogtec-international.com/de_wassernebel/tunnel_brandschutz_systeme

[FRENCH 1994]: S. E. French, „EUREKA 499 – HGV Fire Test (Nov. 1992) – Summary Report“, Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels (E. Ivarson, Ed.), SP Swedish National Testing and Research Institute, 63-85, Borås, Sweden, 1994

[GRUBER 2010]: A. Gruber, „Tunneleinsatz der Feuerwehr in Tirol“, LKZ Prien – Herbsttagung Bozen, 27.10.2010

[HENKE 2004]: A. Henke, M. Gagliardi, „The 2001 Gotthard Road Tunnel Fire“, Tunnel Management International, 7 (1), 2004, 33

[HÖRHAN 2000]: R. Hörhan, „Der Brand im Tauerntunnel“ in „Brandschutz in Verkehrstunneln“ Schlussbericht, STUVA/STUFAtec GmbH, Dezember 2000

[INGASON 2003]: H. Ingason, „Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF)“, International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, Sweden, November 20-21, 2003

[INGASON 2004]: H. Ingason, A. Lönnemark, “Recent achievements regarding measuring of time-heat and time-temperature developments in tunnels”, First International Symposium “Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements”, Prag 2004

[INGASON 2005]: H. Ingason, A. Lönnemark, “Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels”, Fire Safety Journal, 40 (2005), 646

[KANURY 2002]: A. M. Kanury, “Flaming Ignition of Solid Fuels”, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, P. J. DiNenno (Ed.), National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA, 2002

[KIM 2010]: H.K. Kim, A. Lönnemark, H. Ingason, SP Report „Effective Firefighting Operations in Road Tunnels“, SP Technical Research Institute of Sweden, 2010

[KUBIZA 2002]: G. Kubiza, „Probleme der Tunnelsicherheit, Beispiel: Tauerntunnel/Salzburg/Österreich“, CTIF-Symposium Europäische Konferenz für mehr Tunnelsicherheit „Sind Tunnels sicher genug?“, 8.11.2002 Regensdorf/Schweiz

[LACROIX 1997]: D. Lacroix, “New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels”, 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 6 - 8 October, 1997

[LACROIX 2001]: D. Lacroix, The Mont Blanc Tunnel Fire, What happened and what has been learned, Proceedings of the fourth International Conference on safety in Road and Rail Tunnels, Madrid 2001

[LEMAIRE 2002]: A. Lemair, P. H. E. van der Leur, Y. M. Kenyon, "Safety Proef: TNO Metingen Beneluxtunnel – Meetrapport", TNO, TNO – Rapport 2002 – CVB – R05572, 2002

[LÖNNERMARK 2004]: A. Lönnemark, H. Ingason, "Large Scale Fire Tests – Unique Experimental Results", "International Symposium on Tunnel Safety and Security", Greenbelt, MD, USA, 2004

[LÖNNERMARK 2005]: A. Lönnemark, H. Ingason, "Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels", Fire Safety Journal, 40 (2005), 506

[LÖNNERMARK 2005 a]: A. Lönnemark, "On the Characteristics of Fires in Tunnels", Thesis, Lund University, 2005

[LÖNNERMARK 2006]: A. Lönnemark, H. Ingason, "Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires", Fire Technology, 42 (2006), 283

[NFPA 2001]: NFPA 502, "Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", 2001 ed., National Fire Protection Association, 2001

[ONE SEVEN]: recherchiert am 30.10.2013, Fundstelle:
<http://www.oneseven.com/references/stationary-references/>

[PERUGINI 2002]: A. Perugini, Decreto del Procuratore pubblico Antonio Perugini sui fatti avvenuti il 24,20,2001 nella galleria stradale del San Gottardo (uffizieller Untersuchungsbericht), Bellinzona, 28 June 2002

[PIARC 1999]: "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", PIARC, 05.05B-1999, 1999

[SCHULER 2005]: D. Schuler, „Temperatur- und Rauchausbreitung bei Bränden in Strassentunnels“, strasse und verkehr, Nr. 4, 2005, 40

[SCHWEIZERISCHER FEUERWEHRVERBAND 2005]: Schweizerischer Feuerwehrverband, Technische Wegeleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunneln, Bern 2005

[STAMPFLI 2011]: W. Stampfli, „Taktische Vorgehensweise bei Bränden in Straßentunneln – Löschen um zu retten“, Vortrag auf Fachkongress „Gefahrenabwehr in UVA“, 15.10.2011, Erfurt

[STARKE 2010]: Starke, Horst: Fire Suppression in Road Tunnel Fires by a Water Mist System - Results of the SOLIT Project. Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010, 311-322

[STEINER 2002]: W. Steiner, „Gotthard Strassentunnel“ CTIF-Symposium Europäische Konferenz für mehr Tunnelsicherheit „Sind Tunnels sicher genug?“, 8.11.2002 Regensdorf/Schweiz

[STEINER 2006]: W. Steiner, „Tunnelbrände, Strassenrettung, Gefährlich!!!“, Vortrag 12.09.2006

[STUVA 2000]: „Brandschutz in Verkehrstunneln“, Forschungsauftrag FE 82.166/1999/B3 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Schlussbericht, Dezember 2000, STUVA/STUVAtec GmbH

[THON 2011]: Thon (Berufsfeuerwehr Hamburg) mündliche Mitteilung

[URI 2012]: N. Cathomas, B. Bühlmann, A. Mülle, H. Christen, A. Husner, Amt für Umweltschutz Uri, „Feuer- und Chemiewehren im Gotthard-Strassentunnel“, www.chemiewehr-uri.ch, recherchiert am 31.01.2012

[VOETZEL 2004]: A. Voetzel, A. Dix, "A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires", In Joint Issue ITA/PIARC of Route-Roads on Fire Safety in Tunnels, 2004

ANLAGEN

A Brand im Mont Blanc-Tunnel 1999

- A1 Der Mont Blanc-Tunnel im Jahr 1999
- A2 Der Brand im Mont Blanc-Tunnel am 24.03.1999
- A3 Empfehlungen auf der Basis der Erkenntnisse aus dem Brand im Mont Blanc-Tunnel [FALCONNAT 2000]

B Brand im Tauern-Tunnel 1999

- B1 Der Tauern-Tunnel im Jahr 1999
- B2 Der Brand im Tauern-Tunnel am 29.05.1999
- B3 Vergleich der Brände im Mont Blanc-Tunnel und im Tauern-Tunnel

C Brand im St. Gotthard-Tunnel 2001

- C1 Der St. Gotthard-Tunnel im Jahr 2001
- C2 Der Brand im St. Gotthard-Tunnel am 24.10.2001
- C3 Struktur und Aufgaben der Tunnelfeuerwehr am St. Gotthard-Tunnel [URI 2012]
- C4 Konsequenzen aus dem Brand im St. Gotthard-Tunnel am 24.10.2001

D Erläuterungen zu den Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr

E Kriterien zur Einstufung entsprechend NFPA 704 (Gefahrstoffdiamant)

A Brand im Mont Blanc-Tunnel 1999

A1 Der Mont Blanc-Tunnel im Jahr 1999

Der Mont Blanc-Tunnel ist ein Gegenverkehrstunnel, der 1965 in Betrieb genommen wurde. Der Tunnel verbindet Frankreich und Italien und hat eine Länge von 11.600 m. Die maximale Höhe beträgt 6 m bei einer Breite von 8 m, was einer Querschnittsfläche von ca. 50 m² entspricht. Der Tunnel unterliegt der Zuständigkeit von zwei Kontrolleinheiten: Auf der französischen Seite ist dieses ATMB (Autorout et Tunnel du Mont Blanc) und auf der italienischen Seite SITMB (Societa Italiana del Traforo di Monte Bianco).

Die Belüftungsanlage des Mont Blanc-Tunnels besteht aus zwei identisch konfigurierten Abschnitten, d.h. ein Abschnitt auf der französischen Seite und ein Abschnitt auf der italienischen, die unabhängig voneinander gesteuert werden. Jeweils von den Tunnelportalen gehen vier Zuluft-Leitungen aus und versorgen ein Viertel (1.450 m) der Länge der entsprechenden Tunnelhälfte (Abbildungen A1 und A2). Jede einzelne Zuluft-Leitung kann die Bereitstellung von 75 m³/s Frischluft gewährleisten [VOETZEL 2004], [BADINO 2002].

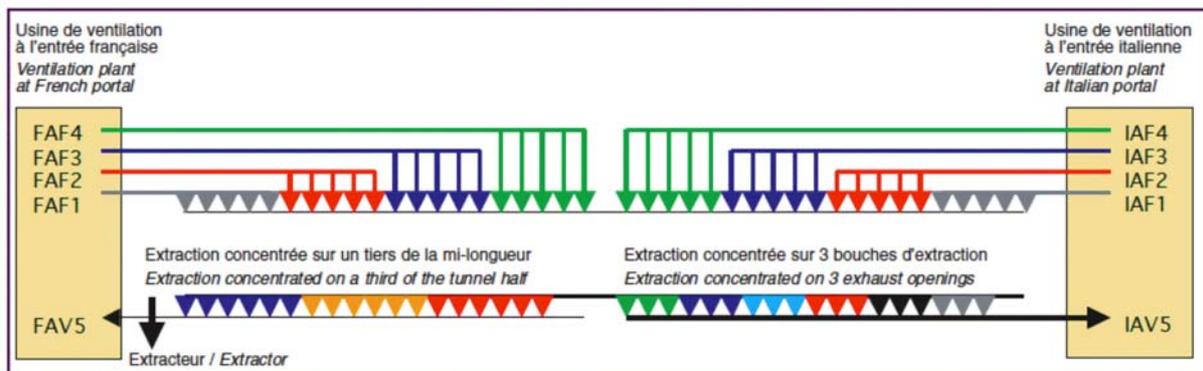


Figure 3
Configuration du système de ventilation du tunnel du Mont-Blanc

Figure 3
Mont Blanc tunnel ventilation system configuration

Abbildung A1: Schema der Belüftungsanlage des Mont Blanc-Tunnels [VOETZEL 2004]

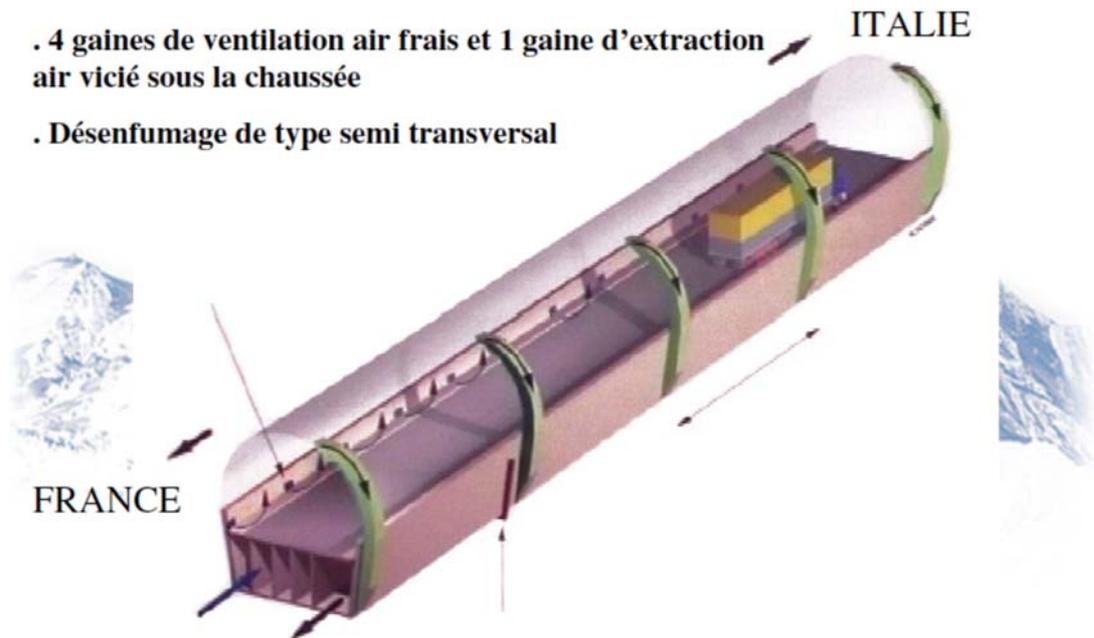


Abbildung A2: Schema des Mont Blanc-Tunnels [BADINO 2002]

Für die Zufuhr von Frischluft steht in jeder Tunnelhälfte eine weitere Leitung zur Verfügung, die im Brandfall entweder auf Zuluft oder Abluft umschaltbar ist. Der Rauch wird durch Klappen in Abständen von 300 m abgesaugt. Auf der französischen Seite ist der umschaltbare Luftkanal durch Absperrungen in drei Abschnitte unterteilt. Beim Betreiben dieser Leitung im Absaug-Modus wird zwangsläufig die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Tunnel signifikant herabgesetzt.

A2 Der Brand im Mont Blanc-Tunnel am 24.03.1999

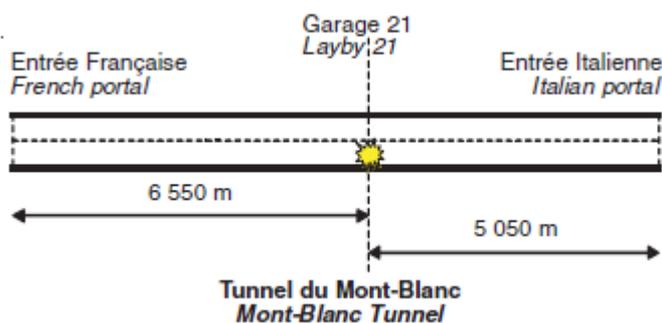


Abbildung A3: Schematische Darstellung des Brandes im Mont Blanc-Tunnel [VOETZEL 2004]

Der Brand brach im Motorraum eines Lastkraftwagens aus, der sich 6,5 km entfernt vom französischen Portal befand und 9 Tonnen Margarine und 12 Tonnen Mehl transportierte. Neben der Ladung waren am LKW als weitere Brandlasten ca. 550 Liter Dieselkraftstoff und

die leicht entflammbare Schaummasse der thermischen Isolierung des Kühl-Sattelauflegers vorhanden. Der LKW stoppte und unmittelbar darauf griff das Feuer auf die Ladung über (nachfolgend als LKW 0 bezeichnet). Es gelang dem LKW-Fahrer nicht, den beginnenden Brand selbst zu löschen. Im Laufe des Brandes nahm die geladene Margarine schnell den Zustand eines leicht entflammbaren Öls an. Wahrscheinlich ist die flüssige Margarine auf die Fahrbahn geflossen und konnte so durch die vergrößerte Oberfläche eine sehr große Brandleistung freisetzen.

Nach Eingang des Alarms an den Tunnelportalen wurden die Ampeln an den Einfahrten auf Rot geschaltet und an der italienischen Seite wurde die Schranke vor dem Tunnel geschlossen.

Mehrere Fahrzeuge, die von der französischen Seite her in den Tunnel einfuhren, kamen hinter dem LKW 0 zum Stehen. Insgesamt wurden 15 LKW (einschließlich LKW 0) auf einer Länge von 500 m in Brand gesetzt, wobei die größte Entfernung zwischen zwei LKW 45 m und der geringste Abstand 3 m betragen. Zwischen diesen 15 LKW befanden sich weiterhin neun Personenkraftwagen, ein Lieferwagen und ein Motorrad, die alle vom Brand eingeschlossen wurden. Auf der Gegenfahrbahn standen acht LKW im Stau, die von der italienischen Seite her in den Tunnel eingefahren waren. Der vorderste LKW aus dieser Reihe hatte einen Abstand von 290 m zum LKW 0 und die Entfernung innerhalb der Reihe betrug zwischen 2 m und 30 m. Alle acht LKW auf der Gegenfahrbahn wurden vom Brand erfasst. Die PKW in dieser Kolonne konnten wenden und aus dem Tunnel herausfahren. Während die Fahrer der acht LKW auf der italienischen Seite ihre Fahrzeuge verlassen und sich in Sicherheit bringen konnten, überlebte keiner der Fahrzeuginsassen, die von der französischen Seite her kamen.

P. Duffé und M. Marec [DUFFÉ, MAREC 1999] schätzten, dass der LKW, der den Brand auslöste (LKW 0), eine Wärmefreisetzungsrate zwischen 75 MW und 110 MW bei einer Branddauer von ein bis zwei Stunden verursachte. Entsprechend der Aussagen von P. Duffé und M. Marec [DUFFÉ, MAREC 1999] sowie von Lacroix [LACROIX 2001] waren für die anderen LKW in dem Bereich, der über eine Ausdehnung von 500 m die vom französischen Portal kommenden Fahrzeuge umfasste, auf Grund der begrenzten Sauerstoffmenge Wärmefreisetzungsraten zwischen 150 MW und 190 MW und Temperaturen im Tunnel über 1000 °C anzusetzen. Die letzteren Angaben beziehen sich auf eine theoretische Branddauer von 7 bis 13 Stunden. Die tatsächliche Dauer war 50 Stunden und das bedeutet einen Brandlast-Mittelwert von 100 MW.

Nach [CARVEL 2004] ist nicht vollständig geklärt, wie ein Feuerübersprung über insgesamt 500 m auftreten konnte, obwohl als mögliche Ursachen Backdraught bzw. Backlayering, brennender flüssiger Kraftstoff und auch ein Einfluss des Materials des Straßenbelags in Betracht gezogen werden.

Ungeachtet dieser Diskussionen besteht in den von verschiedenen Autoren verfassten Untersuchungen zum Brand im Mont Blanc-Tunnel Übereinstimmung darin, dass eine wesentliche Ursache für das verheerende Ausmaß dieses Brandes in der unkoordinierten Steuerung der Lüftungsanlagen des Tunnels zu sehen ist (z.B. [LACROIX 2001], [VOETZEL 2004], [CARVEL 2004], [KIM 2010]). Die natürliche Strömungsrichtung im Mont Blanc-Tunnel ist von Süd nach Nord (von Italien nach Frankreich) gerichtet. Nach dem Ausbruch des Brandes wurde auf der italienischen Tunnelseite über alle Leitungen des Lüftungssystems Frischluft in den Tunnel zugeführt, anstelle des Absaugens von Rauchgasen über die fünfte dafür konzipierte Leitung. Mit dieser Maßnahme verfolgte die italienische Kontrollstation das Ziel, Personen zu schützen, die sie über das Videoüberwachungssystem im Tunnel gesehen hatten. Demgegenüber lief auf der französischen Tunnelseite das für Gefahrensituationen installierte Lüftungsregime an, d.h. die Frischluftzufuhr war gedrosselt und die Absaugung der Rauchgase aktiviert. Lacroix [LACROIX 2001] zeigte, dass diese nicht aufeinander abgestimmten Betriebsweisen der Lüftungstechnik in den beiden Tunnelhälften eine Verstärkung der Intensität des Brandes sowie eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnelinnern in Richtung zum französischen Portal zur Folge hatten. Weiterhin könnten sie die Ursache dafür gewesen sein, dass in der französischen Tunnelhälfte die Schichtung der Rauchgase zusammengebrochen ist, da die Strömungsgeschwindigkeit der Gase mehr als 1 m/s betrug. Dieses bedingte eine vollständige Verrauchung in diesem Tunnelbereich. In der Abbildung A4 ist die Ausbreitung der Rauchgase beim Brand im Mont Blanc-Tunnel graphisch dargestellt.

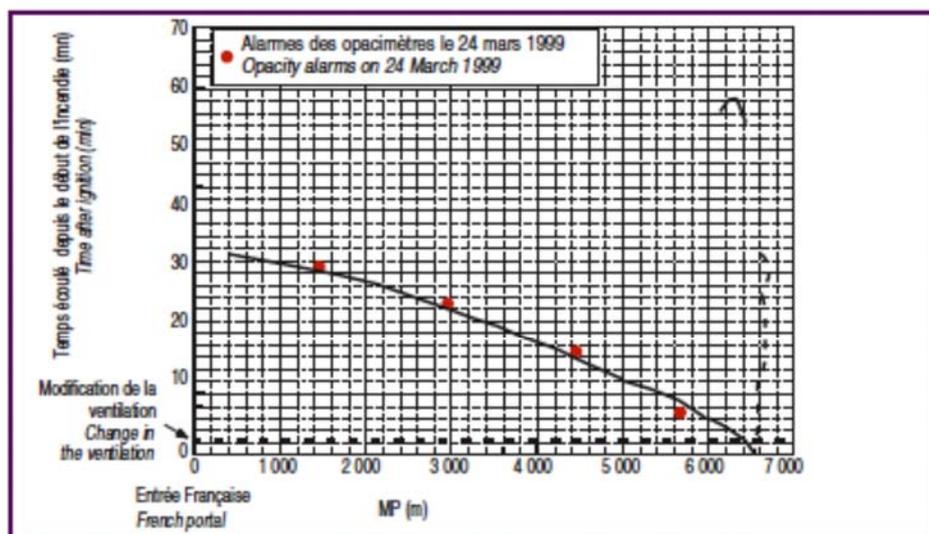


Figure 7
Progression des fumées pendant l'incendie du tunnel du Mont-Blanc
Smoke progress during the Mont Blanc fire

Abbildung A4: Graphische Darstellung der Ausbreitung der Rauchgase beim Brand im Mont Blanc-Tunnel [VOETZEL 2004], Erläuterungen im Text

In der Abbildung A4 entspricht der Zeitpunkt „Null“ dem Ausbruch des Brandes in einer Entfernung von 6,5 km zum französischen Portal. Die roten Markierungen kennzeichnen jeweils den Zeitpunkt und den Ort von Alarmierungen, die automatisch ausgelöst wurden durch Trübungsmesser im Tunnel. Aus der Abbildung A4 ist zu entnehmen, dass die Rauchgase bereits 30 Minuten nach Beginn des Brandes einen Tunnelbereich auf der französischen Seite mit einer Länge von ca. 5.000 m ausfüllten.

Neben der Tatsache, dass die Belüftungstechnik zwischen den französischen und italienischen Tunnelbetreibern nicht koordiniert wurde, war auch die Abstimmung zwischen den Tunnelbetreibern und den Einsatzkräften der Feuerwehren vor Ort mangelhaft.

Fünf Minuten nach der Detektion des Brandes durch einen Trübungsmesser und entsprechendem Alarm fuhr auf der französischen Seite ein Feuerwehrfahrzeug des ATMB mit vier Einsatzkräften in den Tunnel ein. Ein Rettungswagen des ATMB mit zwei Mann Besatzung folgte zwei Minuten später. 16 Minuten nach dem Alarm mussten beide Fahrzeuge auf Grund der extremen Verrauchung des Tunnels in einer Entfernung von 1100 m bzw. 1400 m zum Brandherd stoppen. Ein Fahrzeug einer externen Feuerwehr erreichte 18 Minuten nach dem Alarm den französischen Tunneleingang, musste jedoch ca. 26 Minuten nach dem Alarm auf eine Pannenbucht mit einer Entfernung von 2800 m zum Brand ausweichen. Ein weiteres externes Feuerwehr-Fahrzeug, das zur Rettung des eingeschlossenen vorangegangenen Fahrzeuges in den Tunnel gesandt wurde, musste selbst bereits 1500 m nach der Tunneleinfahrt (5.050 m entfernt vom Brand) eine Pannenbucht aufsuchen. Auf der italienischen Tunnelseite waren keine Einsatzkräfte einer speziellen Tunnelfeuerwehr stationiert. Daher konnten die notwendigen Maßnahmen nur von externen Feuerwehreinheiten gestartet werden. Aber auch diese Kräfte, die 19 Minuten nach dem Alarm am Tunnel eintrafen, wurden durch die starke Rauchentwicklung am Vordringen bis zum Brand gehindert. Sie zogen sich bis zu einem Schutzraum in der Entfernung von 900 m zum Brand zurück. Die folgenden Aktionen der nachrückenden Einsatzkräfte der Feuerwehren waren nun zwangsläufig sowohl auf italienischer als auch französischer Seite darauf gerichtet, die eingeschlossenen Feuerwehrmänner zu retten.

Das zumindest in frühen Phasen des Brandes stark unterschiedliche Ausmaß der Verrauchung im französischen bzw. italienischen Tunnelbereich wird durch die folgenden Befunde nochmals verdeutlicht: Eine französische Motorradstreife, die sich zur Zeit des Brandes im italienischen Tunnelabschnitt aufhielt, konnte sich dem LKW, in dem sich das Feuer zuerst entzündete, bis auf 10 m noch 13 Minuten nach Ausbruch des Brandes nähern. Demgegenüber musste das 1. Fahrzeug einer externen Feuerwehr auf der französischen Seite schon 26 Minuten nach dem Alarm bereits in einer Entfernung von 2800 m zum Brand anhalten und sich zurückziehen. Unter diesen Bedingungen wirkte sich besonders nachteilig aus, dass eine Tunnelfeuerwehr an der französischen Tunneleinfahrt, aber nicht an der

italienischen stationiert war. Daher wurden alle Maßnahmen zur Rettung und Bekämpfung des Brandes aus Richtung der wesentlich stärker verrauchten Tunnelseite eingeleitet.

Die Lösch- und Rettungsarbeiten beim Brand im Mont Blanc-Tunnel 1999 wurden durch weitere Probleme beeinträchtigt, wie die Folgenden [STUVA 2000]:

- Fehlende Kompatibilität zwischen den Atemschutzgeräten der Tunnelbetreibergesellschaften und denen der Feuerwehr
- Unzureichender Wasserdruck in der französischen Tunnelhälfte
- Beschwerliche Nutzung der Atemschutzgeräte mit geschlossenem Kreislauf in der überhitzten Umgebung
- Löschwasserpumpenausfall
- Kommunikationsprobleme im Tunnelinnern, weil ein Teil der Kommunikationseinrichtungen sehr rasch vom Feuer zerstört wurde
- Fehlende Kompatibilität der Schlauchanschlüsse für die verschiedenen Einsatzkräfte
- Die Anzahl der in den Brand involvierten Personen und Fahrzeuge war zu keinem Zeitpunkt des Brandes bekannt.

A3 Empfehlungen auf der Basis der Erkenntnisse aus dem Brand im Mont Blanc-Tunnel [FALCONNAT 2000]

Die zur Analyse des Brandereignisses im Mont Blanc-Tunnel eingesetzte Untersuchungskommission hat eine Reihe von Empfehlungen ausgesprochen, unter anderem auch für LKW, die nicht nur für den Mont Blanc-Tunnel, sondern generell für Tunnel in ganz Frankreich gültig sind:

- Neue Vorschriften für potentielle Gefahrgüter. Der LKW, der den Brand im Mont Blanc-Tunnel verursachte, transportierte Margarine. Unter diesem Aspekt ist darüber zu entscheiden, ob die Liste der Gefahrgüter zu ergänzen ist.
- Besondere Vorschriften für LKW-Kühlfahrzeuge
- Kontrolle der LKW vor der Tunneleinfahrt. Zu kontrollieren ist, ob der Motor überhitzt ist, und auch, ob Flüssigkeiten irgendwo austreten
- Beschränkung der LKW auf eine Breite von 2,25 und 2,45 m. Breitere LKW dürfen auch durch den Tunnel fahren, aber nur als begleitete Sondertransporte.
- Abstände zwischen den Kraftfahrzeugen beim Fahren oder beim Halten im Tunnel: 100 m.

Weitere, insbesondere technische Empfehlungen, waren die Folgenden:

- Festlegung einer Absaugmenge von $110 \text{ m}^3/\text{s}$ auf einer Tunnelstrecke von 600 m und einer Größe der Brandlast auf 30 MW. Zu letzterem merkt Falconnat an, dass diese Werte unverständlich sind bei Berücksichtigung der abgeschätzten mittleren Brandleistung von 100 MW beim Brand im Mont Blanc-Tunnel.
- Der Luftkanal für Zuluft und Abluft darf nicht umschaltbar sein.
- Die Saugklappen, vorher in einem Abstand von 300 m, müssen jetzt im Abstand von 100 m eingebaut werden.
- Begrenzung der Geschwindigkeit des Luftstromes auf 1 bis 1,5 m/s, damit die Schichtung des Rauches erhalten bleibt und sich die Ausdehnung des Rauchs verlangsamt.

B Brand im Tauern-Tunnel 1999

B1 Der Tauern-Tunnel im Jahr 1999

Die Tauern-Autobahn ist eine der wichtigsten Nord-Süd-Verbindungen durch Österreich. Sie beginnt in Salzburg Walsertal und endet im Bundesland Kärnten bei Villach. Entlang der gesamten Strecke liegen sehr viele Tunnel. Die mittlere Verkehrsstärke auf der Scheitelstrecke zwischen Flachau und Gmünd beträgt unter 15.000 Fahrzeuge pro Tag, wobei in der Hauptreisezeit eine Spitzenfrequenz bis 40.000 Fahrzeuge pro Tag erreicht wird. Der LKW-Anteil beträgt ca. 19 % [HÖRHAN 2000]. Der Tauern-Tunnel hat eine Länge von 6.400 m und wird im Gegenverkehr mit einem Fahrstreifen je Richtung befahren, der Querschnitt weist zwei je 3,75 m breite Fahrstreifen auf, beiderseits befindet sich ein erhöhter Seitenstreifen mit einer Breite von 1,0 m (Abbildung B1).

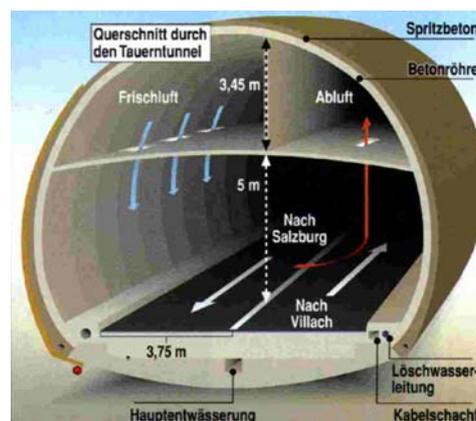


Abbildung B1: Querschnitt des Tauern-Tunnels [KUBIZA 2002]

Das Lüftungssystem ist als Vollquerlüftung mit vier Lüftungsabschnitten ausgebildet, wobei Zu- und Abluft in den äußeren Abschnitten 1 und 4 über die entsprechende Portalstation transportiert werden, während die mittleren Abschnitte 2 und 3 von einem Lüftungsschacht in Tunnelmitte versorgt werden (Abbildung B1). Zu- und Abluft werden über Kanäle oberhalb der Fahrbahn befördert, die durch eine Zwischendecke vom Fahrraum getrennt sind. Die maximale Frischluftmenge beträgt entsprechend der Lüftungsberechnung ca. $190 \text{ m}^3/\text{s}$ je km und die maximale Abluftmenge $115 \text{ m}^3/\text{s}$ je km, bezogen jeweils auf einen Lüftungsabschnitt [HÖRHAN 2000]. Die Lüftungsabschnitte sind jeweils 1.500 m, nur Abschnitt 4 ist 1.900 m lang.

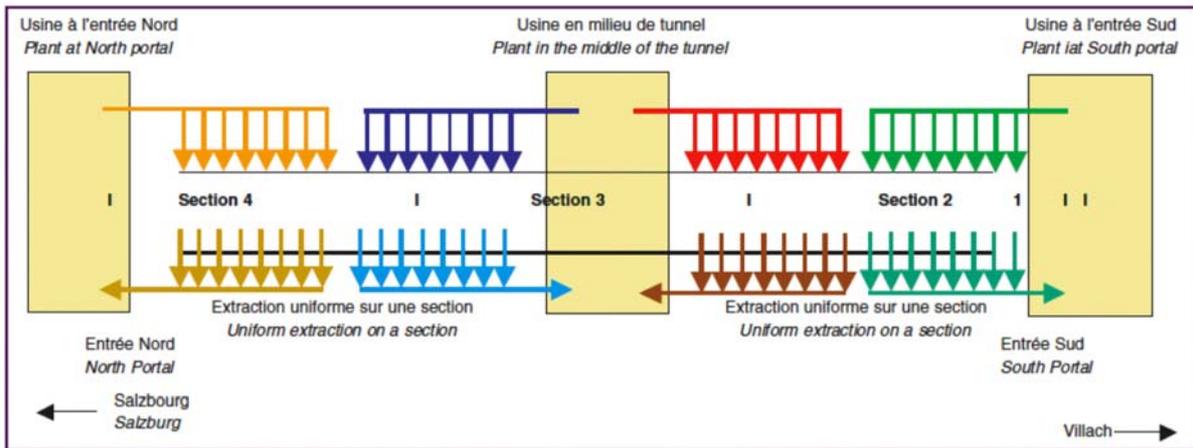


Figure 4
Configuration du système de ventilation du tunnel des Tauern

Figure 4
Tauern tunnel ventilation system configuration

Abbildung B2: Schema der Belüftungsanlage des Tauern-Tunnels [VOETZEL 2004]

Der Tauern-Tunnel verfügt über keine Flucht- oder Zugangsmöglichkeiten außer über die Tunnelportale.

B2 Der Brand im Tauern-Tunnel am 29.05.1999

Im Mai 1999 war im Bereich des Nordportals und ca. 500 m in die Tunnelröhre hinein die Richtungsfahrbahn Süd durch eine Baustelle nicht benutzbar. Der Verkehr konnte nur jeweils in eine Richtung geführt werden, zur Freigabe der jeweiligen Fahrtrichtung war im Tunnel eine zusätzliche Ampelanlage installiert. Am 29.05.1999 wurde 4.41 Uhr die Ampel der Richtungsfahrbahn Salzburg auf Rot geschaltet. Um 4.50 Uhr schlug der Brandmelder in der Tunnelwarte Alarm. Von der Tunnelwache erfolgte sofort eine Meldung an Feuerwehr und Rettungsdienste. Des Weiteren wurden die beiden Tunnelportale auf Rot geschaltet. Auslöser für das Ereignis war ein Auffahrunfall. Ein mit verschiedenen Spraydosen, unter anderem Lacke der Gefahrgutklasse 9, beladener LKW war in Richtung Norden unterwegs und musste hinter einigen schon vor der Baustellenampel stehenden Fahrzeugen anhalten. Dahinter kamen vier PKW zum Stehen.

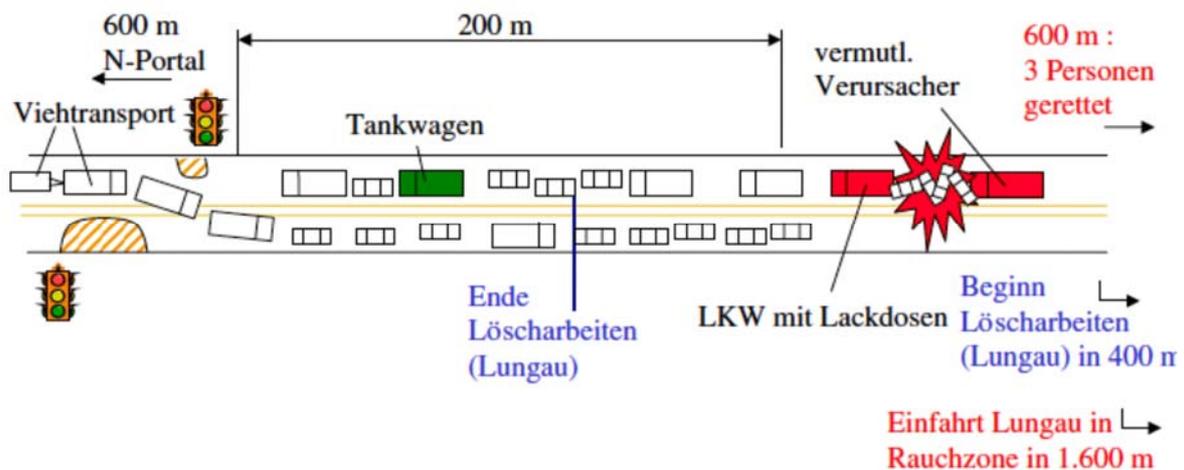


Abbildung B3: Schematische Darstellung des Unfallherganges und des Brandes im Tauern-Tunnel [KUBIZA 2002]

Ein weiterer LKW fuhr wahrscheinlich wegen überhöhter Geschwindigkeit auf die stehende Kolonne auf, schob dabei zwei PKW unter den LKW mit den Spraydosen und drückte zwei PKW zur Tunnelwand (Abbildung B3). Die beiden LKW standen nachher direkt hintereinander, d.h. Ladebordwand an Windschutzscheibe. In drei der vier PKW starben vermutlich als direkte Folge des Auffahrunfalls acht Personen. Aus einem der beiden an die Wand gedrückten PKW konnten zwei Personen leicht verletzt flüchten.

Es ist anzunehmen, dass bei dem Unfall die Treibstofftanks der PKW aufgerissen wurden, der Treibstoff ausfloss und sich entzündete. Auch auf den mit Lacksprühdosen beladenen LKW sprang das Feuer rasch über. Da der Brand vom Brandmeldesystem sehr schnell erfasst und lokalisiert worden war, wurde die Belüftungsanlage nach der Brandmeldung automatisch auf Brandbetrieb umgeschaltet. So wurden im nördlichen 4. Tunnelsegment die Rauchgase mit einer Kapazität bis zu $230 \text{ m}^3/\text{s}$ in den Abluftkanal gesaugt. Es wurde jedoch in den anderen drei Segmenten keine Frischluft zugeführt, sondern nur durch die Tunnelportale. Es bildete sich eine Luft-Rauch-Schichtung heraus, wobei der Rauch sich im Wesentlichen unmittelbar unter der Decke sammelte und eine rauchfreie Zone in Bodennähe entstand. Diese Schichtung konnte 10 – 15 Minuten aufrechterhalten werden [INGASON 2003]. Eine größere Anzahl von Tunnelnutzern (geschätzt werden ca. 80 Personen) konnte so entweder in ihren Fahrzeugen oder zu Fuß den Tunnel verlassen. In der Folge ereigneten sich mehrere Explosionen. Sie brachten eine sehr starke Hitze- und Rauchentwicklung mit sich, so dass der Fahrraum nicht mehr rauchfrei gehalten werden konnte und der Rauch zum Nordportal strömte.

Um 5.15 Uhr, d. h. 25 Minuten nach Alarm des automatischen Brandmeldesystems, fuhren die örtlichen freiwilligen Feuerwehren von Zedernhaus und St. Michael am südlichen Portal

in den Tunnel ein. Sie waren mit umluftunabhängiger Atemschutztechnik ausgerüstet. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Lüftungsanlage manuell gesteuert. Nachdem davon ausgegangen werden konnte, dass im nördlichen Tunnelbereich alle Personen geflüchtet waren, wurde im 3. Lüftungsabschnitt Zuluft eingeleitet und somit der Rauch in Richtung Nordportal gedrückt. Dieses unterstützte das Vorgehen der Feuerwehr im südlichen Bereich. Sie rettete drei Personen, die in einer Notrufnische eingeschlossen waren, und löschte ca. 15 – 17 Fahrzeuge. Am weiteren Vordringen wurden die Feuerwehrleute durch eine starke Hitze- und Raumentwicklung gehindert. Daher wurde 9.15 Uhr beschlossen, den Einsatz im südlichen Tunnelbereich zu unterbrechen und die Löscharbeiten auf der nördlichen Seite zu beginnen. Dort waren bereits seit der Alarmierung unmittelbar nach Brandausbruch die freiwilligen Feuerwehrkräfte aus Flachau stationiert. Sie konnten jedoch den Löschangriff wegen der extremen Temperaturen nicht einleiten. Um die Löscharbeiten von dieser Seite her zu starten, wurde die Strömungsrichtung der Rauchgase umgelenkt, indem der 3. Lüftungsabschnitt auf Abluft geschaltet wurde. Mit dieser Maßnahme wurden die Rauchgase Richtung Süden gerichtet und der Nordbereich des Tunnels langsam rauchfrei. Nach Absicherungsarbeiten an der Tunneldecke konnte die Feuerwehr den Brand gegen 22.00 Uhr vollständig löschen.

Am Nordportal waren 248 Einsatzkräfte der Feuerwehr mit 44 Fahrzeugen und am Südportal 147 Feuerwehrleute mit 22 Fahrzeugen beteiligt.

Neben den oben erwähnten acht Opfern gab es noch weitere vier Todesopfer, deren Tod wahrscheinlich durch menschliches Fehlverhalten zurückzuführen ist. Zwei Personen blieben aus schwer nachvollziehbaren Gründen in ihrem Auto sitzen. Ein LKW-Fahrer kehrte, nachdem er bereits in Sicherheit war, zu seinem Fahrzeug zurück, um Dokumente zu holen. Ein weiterer LKW-Fahrer wurde etwa 800 m entfernt von der Unfallstelle erstickt aufgefunden.

B3 Vergleich der Brände im Mont Blanc-Tunnel und im Tauern-Tunnel

Sowohl der Brand im Mont Blanc- als auch der Brand im Tauern-Tunnel im Jahr 1999 waren dadurch charakterisiert, dass sie sich extrem schnell mit sehr starker Rauch- und Hitzefreisetzung entwickelten. Bei beiden Ereignissen war während der gesamten Dauer der Brandbekämpfung die Zahl der betroffenen Personen und Fahrzeuge unbekannt. Die Systeme der Videoüberwachung des Tunnels und der Nachrichtenansage über Radio waren in beiden Fällen sehr kurz nach Brandausbruch funktionsuntüchtig.

Demgegenüber muss herausgestellt werden, dass die Einbeziehung der Tunnellüftung in das Konzept der Brandbekämpfung sich zwischen beiden Ereignissen erheblich unterschied. Während bei dem Brand im Mont Blanc-Tunnel keine Abstimmung der Funktionsweise der

Tunnellüftung auf die Aktionen der Feuerwehr gegeben war, wurde im Tauern-Tunnel die Steuerung der Lüftung mit den Möglichkeiten der Selbstrettung der Tunnelnutzer und dem Vorgehen der Einsatzkräfte koordiniert. Dieses gestattete darüber hinaus den Angriff der Einsatzkräfte der Feuerwehren an beiden Seiten des Brandes.

C Brand im St. Gotthard-Tunnel 2001

C1 Der St. Gotthard-Tunnel im Jahr 2001

Der St. Gotthard-Tunnel befindet sich in der Schweiz zwischen Airolo (1.145 m über N.N.) und Göschenen (1.081 m über N.N.). Er ist Teil der schweizerischen Autobahn A2, die eine der wichtigsten europäischen Straßenverbindungen über die Alpen darstellt, und ist ein einröhriger Gegenverkehrstunnel. In jeder Richtung sind jeweils eine Fahrspur vorhanden, die baulich nicht voneinander getrennt sind. Der Tunnel wurde 1980 in Betrieb genommen und ist 16.918 m lang, hat eine Höhe von 5,3 m, eine Breite von 7,8 m und eine Querschnittsfläche von 41 m². Das Lüftungssystem wird vorwiegend im Modus der Querlüftung betrieben, kann aber auch als Halbquerlüftung funktionieren, z.B. bei geringer Verkehrsdichte. Der Gesamttunnel verfügt über sechs Belüftungszentralen (Abbildung C1). Die an die Tunnelportale angrenzenden Lüftungsabschnitte werden von Lüftungszentralen an den Portalen gespeist, während die anderen Bereiche durch vier Lüftungsschächte (Höhe bis zu 844 m) versorgt werden. Die gleichmäßige Verteilung der zugeführten Frischluft wird durch Öffnungen im unteren Bereich der Tunnelseitenwände gewährleistet, die einen Abstand zueinander von ca. 16 m haben.

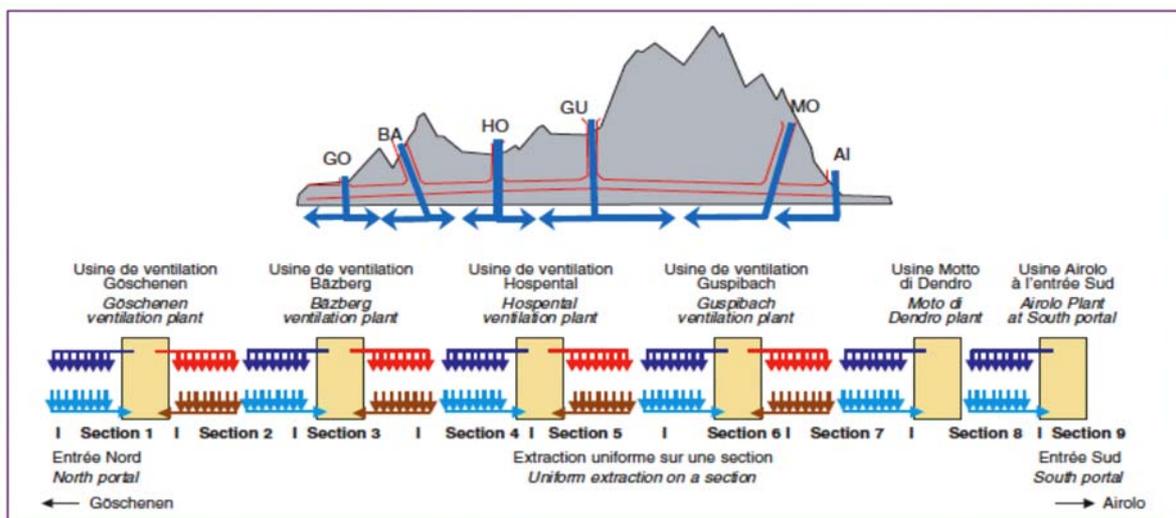


Abbildung C1: Schema der Belüftungsanlage des St. Gotthard-Tunnels [VOETZEL 2004]

Die Abluft wird über Klappen abgeführt, die sich in einem Abstand von 8 – 16 m in der Zwischendecke befinden. Das Lüftungsregime kann sich zwischen den einzelnen Lüftungssektoren unterscheiden. Innerhalb eines Lüftungsbereiches sind jedoch Zu- und Abführung konstant. Zum Zeitpunkt des Brandes im Jahr 2001 war der St. Gotthard-Tunnel

noch nicht mit der Möglichkeit ausgestattet, die Gasabsaugung auf einen kleineren Bereich als einen Lüftungsabschnitt zu konzentrieren. Die maximale Kapazität der Luftzuführung bzw. -abführung beträgt $2.150 \text{ m}^3/\text{s}$, was $125 \text{ m}^3/\text{s}$ je km entspricht [BETTELINI 2003].

Ein Sicherheitsstollen verläuft parallel zum Straßentunnel an der Ostseite der Fahrbahn. Jeweils nach 250 m führt eine Tür von der Fahrbahn in einen Schutzraum und von dort über eine weitere Tür in den Sicherheitsstollen. Sowohl Sicherheitsstollen als auch Schutzraum werden mit Überdruck belüftet, sodass toxische Gase von der Fahrbahn nicht in den Schutzraum eindringen können.

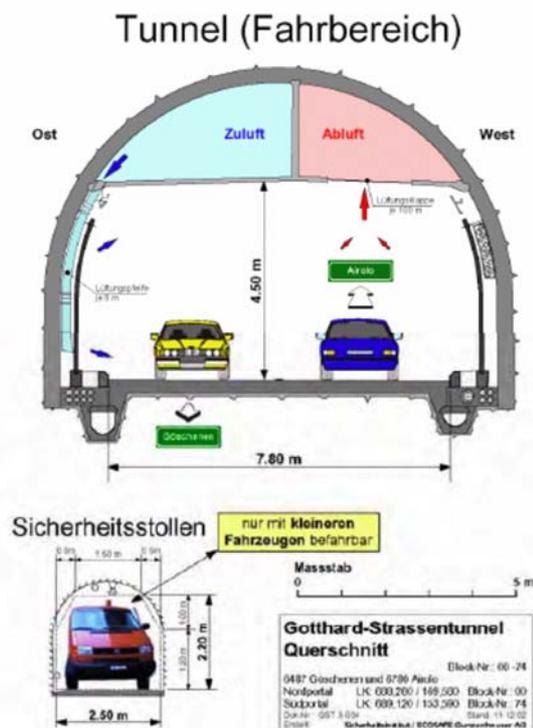


Abbildung C2: Schema des St. Gotthard-Tunnels [STEINER 2006]

C2 Der Brand im St. Gotthard-Tunnel am 24.10.2001

Der Brand am 24.10.2001 wurde primär durch eine Frontalkollision zweier LKW verursacht. Der Unfall sowie die Dynamik des Brandes konnten sehr detailliert auf Grund von Zeugenaussagen, Untersuchungen der Fahrzeugfracks und numerischen Simulationen rekonstruiert werden [BETTELINI 2003], [PERUGINI 2002].

Ein belgischer LKW, der mit 7,5 Tonnen verschiedenen Materialien (Textilien, fotografische Filmrollen) beladen war, fuhr am Südportal in den St. Gotthard-Tunnel ein und kollidierte nach ca. 1.100 m mit der rechten Tunnelwand, wurde anschließend auf die Gegenfahrbahn abgelenkt und prallte an die linke Tunnelwand. In der Abbildung C3 ist dieser LKW als Fahrzeug 1 gekennzeichnet. Gleichzeitig war ein italienischer LKW, dessen Fracht aus 1,1

Tonnen Reifen bestand, in Richtung Süden unterwegs (in Abbildung C3 Fahrzeug 2). Sein Versuch, dem auf die Gegenfahrbahn gelangten LKW 1 auszuweichen, schlug fehl, sodass die beiden LKW jeweils mit ihren rechten Seiten zusammen stießen. Untersuchungen zeigten, dass die Geschwindigkeit des LKW 2 bei 10 - 15 km/h lag, aber der LKW 2 selbst nach der Kollision mit der Wand sich noch mit einer Geschwindigkeit von ca. 45 km/h bewegte [BETTELINI 2003]. Bei dem Aufprall barst der Tank des LKW 1, es floss Dieselkraftstoff auf die Fahrbahn. Dieselkraftstoff war jedoch auch mit heißen Motorteilen in Kontakt gekommen und verdampft. Von Fahrern vor Ort waren Rauchwolken bemerkt worden. Durch einen Kurzschluss in der Batterie des LKW wurde das Diesel-Luft-Gemisch gezündet, das sich rasant schnell ausbreitete.

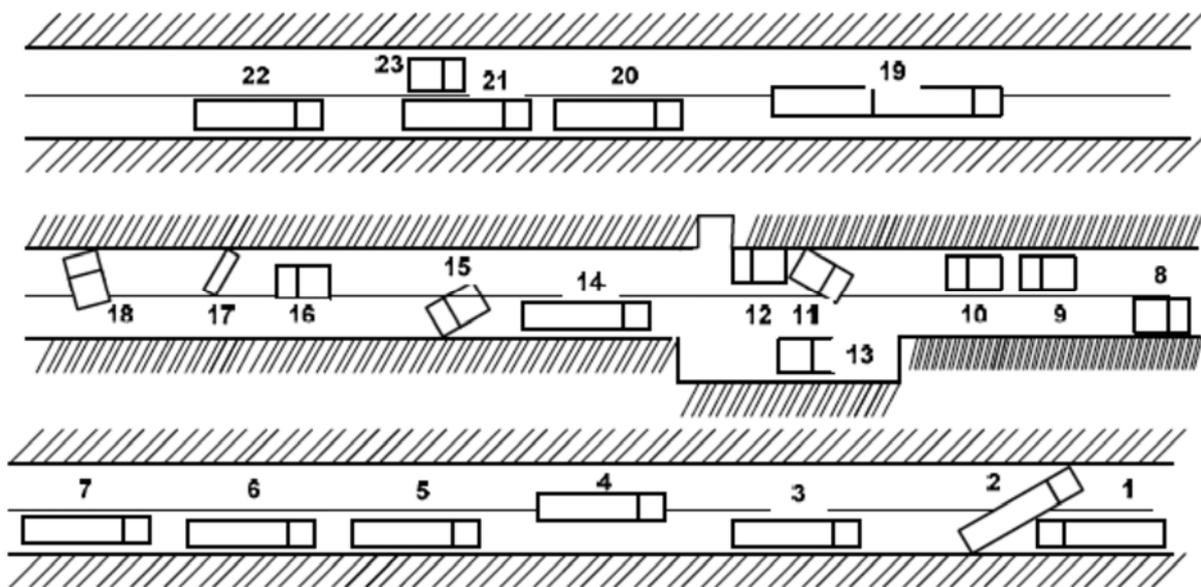


Abbildung C3: Im Brandverlauf involvierte Fahrzeuge beim Brand im St. Gotthard-Tunnel 2001 [KIM 2010]

Innerhalb von vier Minuten standen die beiden kollidierten LKW 1 und 2 voll in Brand [VOETZEL 2004]. Die hohen Temperaturen lösten Explosionen infolge von platzenden Fahrzeugreifen aus und entzündeten weitere Fahrzeuge. Der Brand pflanzte sich auch in der seitlichen Schlitzrinne fort, da sich auch dort Diesel gesammelt hatte. Die Siphons in den Sammelleitungen begrenzten jedoch die Ausbreitung.

Die Angaben zu den Wärmefreisetzungsraten dieses Brandes schwanken zwischen größer als 100 MW [BETTELINI 2003] und zwischen 120 MW bis 200 MW [VOETZEL 2004]. Die brennenden Reifen, die der LKW 2 als Fracht transportierte, verursachten eine starke Rauchgasentwicklung. Eine Rauchgas-Luftschichtung konnte sich auf Grund der extrem großen Rauchgasmenge nicht ausbilden. Zusätzlich verhinderte die hohe Anzahl von im Stau stehenden Fahrzeugen diese Schichtung.

Bereits eine Minute (9.40 Uhr) nach Brandausbruch informierte ein Verkehrsteilnehmer die Einsatzzentrale, die unmittelbar darauf die Tunnelfeuerwehr des Gotthard-Tunnels alarmierte. Innerhalb weiterer drei Minuten rückten die Einsatzkräfte von beiden Portalen her aus. Auf der Südseite konnte die mit Atemschutz ausgestattete Feuerwehr bis an den Brandherd vordringen und mit dem Löschangriff mit Schaum und Wasser beginnen.



Abbildung C4: Anfangsphase des Brandes im St. Gotthard-Tunnel 2001, vom Süden her aufgenommen, Foto von Claudio Grassi in [BETTELINI 2003]

Mehr als 30 Personen, die sich in unmittelbarer Nähe zum Ausgangspunkt des Brandes befanden, konnten flüchten – entweder im Fahrbahnbereich selbst oder über die Schutzräume und den Sicherheitsstollen. Es ist unbekannt, weshalb ein LKW-Fahrer den Schutzraum nochmals verließ und dann nicht mehr gefunden werden konnte. Der Fahrer des LKW, der den Brand verursachte, konnte den Schutzraum nicht erreichen und starb in 300 m Entfernung zum Brandherd.

Auf der Nordseite des Brandes wurde das Feuerwehrfahrzeug in etwa 2.000 m Entfernung zum Unfallort an der Weiterfahrt wegen der hohen Temperaturen und der starken Rauchentwicklung gehindert. Das weitere Vorrücken erfolgte über den Sicherheitsstollen.

Die um mehrere Ortsfeuerwehren verstärkte Tunnelfeuerwehr trug nun den Löschangriff mit Wasserwerfern in beiden Richtungen vor. Im Verlauf des Einsatzes mussten sich die Feuerwehrleute aus dem Fahrraum auf Grund der großen Hitze zurückziehen. Die Wasserwerfer wurden dennoch in Betrieb gehalten. So konnte gegen 12.00 Uhr, d. h. etwa 2,5 Stunden nach Ausbruch des Brandes, die weitere Ausdehnung des Brandes verhindert werden. Am folgenden Morgen war die Temperatur so weit abgefallen, dass die

Löscharbeiten unterbrochen wurden, um die Opfer zu bergen. Am Abend des 25. Oktober um 22.30 Uhr meldete die Einsatzleitung offiziell den Brand als gelöscht [STEINER 2002].

Das Lüftungsregime des Tunnels wurde ca. fünf Minuten nach Ausbruch des Brandes von Halbquerlüftung zur vollständigen Querlüftung umgeschaltet. Wegen der hohen Geschwindigkeit, mit der die Dimension des Brandes wuchs, konnte nicht verhindert werden, dass die Rauchgase sich in den nördlichen Tunnelbereich ausbreiteten, bevor die volle Intensität der Lüftung wirksam wurde. Bereits vier Minuten nach Beginn des Brandes war der Tunnel in nördlicher Richtung über eine Strecke von 500 m verraucht [HENKE 2004]. Diese Zeit war für die Tunnelnutzer, die schnell auf die Situation reagierten, ausreichend, um sich in Sicherheit zu bringen. Die aufgetretene Ausbreitungsgeschwindigkeit des Rauchs entspricht den Werten, die aus früheren Brandereignissen bekannt ist, wie aus der Abbildung C5 zu entnehmen ist. Nach [EGGER 2002] kann die Rauchgeschwindigkeit in Bodenhöhe bis zu 2 m/s und in einer Höhe von 2,10 m bis zu 12 m/s betragen. Ersteres entspricht der Schrittgeschwindigkeit eines Menschen und Letzteres der doppelten Geschwindigkeit

Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Rauch (U_v)

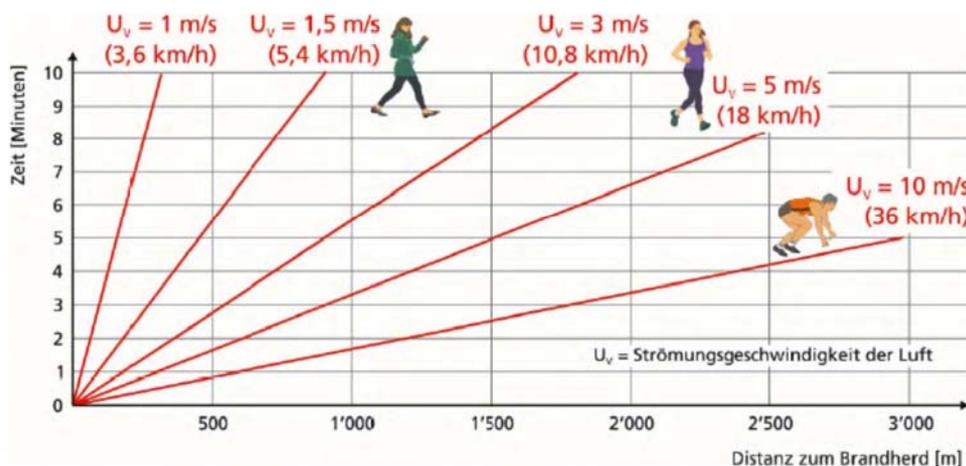


Abbildung C5: Ausbreitungsgeschwindigkeit von Brandrauch [STAMPFLI 2011]

eines Marathonläufers.

11 Personen sind in den Brandgasen erstickt. Sie konnten die beleuchteten Eingänge zu den Schutzräumen in der Dunkelheit nicht erkennen oder wurden von der sich schnell ausbreitenden Rauchwand in den Fahrzeugen überrascht. Bis zu einem Abstand von 1,3 km vom Zentrum des Feuers wurden Personen tot aufgefunden. Die Rauchwolke hat sich über eine Länge von 3 km vom Ereignis in Richtung Norden bewegt. Zwölf Personen litten an Rauchvergiftungssymptomen.

In einem Bereich mit der Länge von ca. 230 m brach die Zwischendecke des Tunnels herab. Dieser Bereich wurde als die so genannte „rote Zone“ bezeichnet. Rußablagerungen breiteten sich über eine Entfernung von mehr als einen Kilometer vom Ausgangsort des Brandes im Tunnel aus. Dieses wird in der Abbildung C6 anschaulich dargestellt.



Abbildung C6: Im Brandverlauf involvierte Fahrzeuge beim Brand im St. Gotthard-Tunnel 2001 [FEHR 2002], vgl. auch Abb. C3

C3 Struktur und Aufgaben der Tunnelfeuerwehr am St. Gotthard-Tunnel [URI 2012]

Der gesamte Schwerverkehr (auch Nicht-Gefahrgut) hat im St. Gotthard-Tunnel in den vergangenen Jahren um 7 bis 9 % jährlich zugenommen; seit dem Tunnelbrand 2001 wird er aus Sicherheitsgründen dosiert und ist auf ca. 4.000 Fahrzeuge pro Tag in beide Richtungen eingeschränkt. Als Vergleich dazu werden in den Abbildungen C7 und C8 das Gesamtverkehrsaufkommen und die transportierten Gefahrgut-mengen gezeigt [URI 2012].

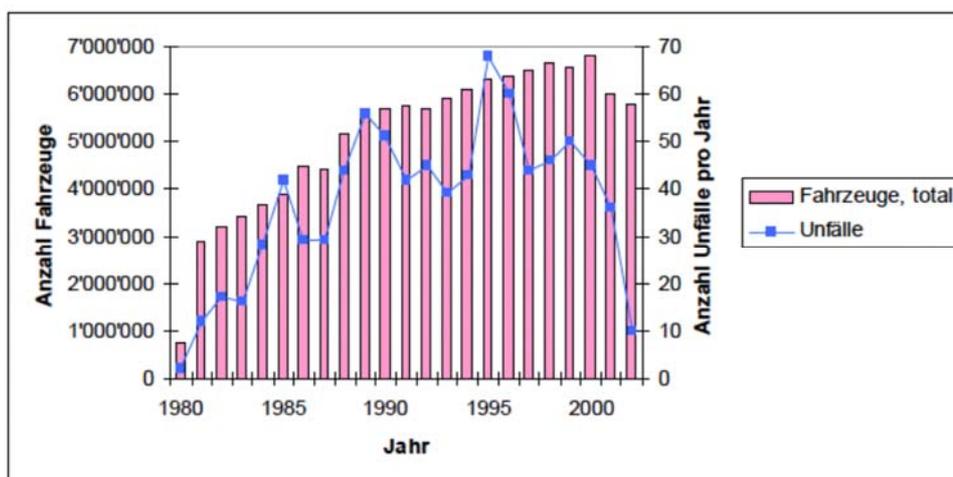


Abbildung C7: Gesamtverkehrsaufkommen im St. Gotthard-Tunnel [URI 2012]

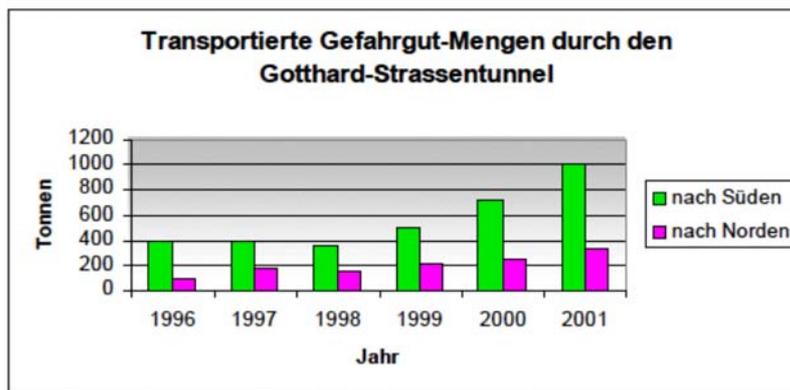


Abbildung C8: Jährliche transportierte Gefahrgutmengen im St. Gotthard-Tunnel [URI 2012]

Die Steuerung und Kontrolle des Verkehrsflusses sowie der Tunnelanlagen erfolgt über zwei baugleiche Zentralen in Airolo und Göschenen. Jeweils eine Zentrale übernimmt die Tunnelführung während 2 Wochen. An beiden Portal-Seiten sind seit 1980 Feuerwehr-Stützpunkte installiert. Diese sind organisatorisch in der "Schadenwehr Gotthard" zusammenfasst. Jeweils vier Mann sind während 365 Tagen rund um die Uhr einsatzbereit. Vom Zeitpunkt der Alarmierung bis zur Ausfahrt vergehen knapp 3 Minuten. Die beiden Feuerwehren sind ausgerüstet mit je 2 Tanklöschfahrzeugen (Zusatzausrüstung für Personenrettung), welche im Tunnel auch am Ort wenden können. Zur Ausrüstung gehören umluftunabhängige Kreislaufgeräte, die eine Einsatzzeit von bis zu 4 Stunden ermöglichen. Insgesamt stehen rund 100 Mann in der Tunnel-Feuerwehr auf beiden Seiten zur Verfügung.

Ereignisse, bei denen chemische Substanzen involviert sind, werden in der Schweiz nicht durch die Feuerwehren, sondern durch Chemiewehr-Stützpunkte bekämpft. Chemiewehren entsprechen den TUIS-Werkfeuerwehren in Deutschland. Im Raum des Gotthard-Straßentunnels bestehen zwei Chemiewehr-Hauptstützpunkte in Bellinzona (Süd) und Altdorf (Nord). Die Anfahrtszeiten von 30 (Nord) bzw. 45 Minuten (Süd) sind relativ lang, sodass die Portal-Feuerwehren ab dem Jahre 2000 mit den Mitteln eines regionales Chemiewehr - Stützpunktes ausgerüstet und entsprechend ausgebildet wurden. Die Angehörigen der sogenannten "Schadenwehr Gotthard / Centro d'intervento San Gottardo" (Intervention Team Gotthard) haben die Aufgabe, den feuerwehrtechnischen Ersteinsatz auch bei einem Chemie-Ereignis zu leisten. Der eigentliche Chemie-Einsatz wird durch die Chemiewehr-Hauptstützpunkte Bellinzona und Altdorf ausgeführt.

C4 Konsequenzen aus dem Brand im St. Gotthard-Tunnel am 24.10.2001

Als Reaktion auf die schweren Tunnelbrände hat das Bundesamt für Straßen in der Schweiz (ASTRA) ein Programm zur Nachrüstung der Tunnel beschlossen. Es wurden die folgenden

Prioritäten festgelegt:

- Verbesserung der Erkennbarkeit der Sicherheitseinrichtungen (gut erkennbare optische Signale, optische Leiteinrichtungen, markierte Fluchtwege und beleuchtete Ausgänge)
- Tunnellüftung (System von Ventilatoren und Abluftkanälen, die ein gezieltes Komprimieren und Absaugen des Rauches ermöglichen)
- Fluchtwege in Tunneln mit großem als auch mit geringem Verkehrsaufkommen.

Speziell für den Gotthard-Tunnel wurde ein so genanntes Tropfenzählersystem zur Dosierung des LKW-Aufkommens eingeführt [ASTRA 2012]. Damit konnte der Verkehr am Gotthard-Tunnel verflüssigt und gleichzeitig der Sicherheitsabstand zwischen zwei LKW gewährleistet werden. Im Tropfenzählersystem muss jeder LKW einzeln in den Tunnel einfahren. Die Anzahl der LKW, die den Gotthard-Tunnel passieren dürfen, bewegt sich in einer Spanne zwischen 60 bis maximal 150 Fahrzeuge pro Richtung und Stunde und ist abhängig vom PKW-Aufkommen. Als Bewertungsgrundlage dient die Festlegung, dass pro Richtung und Stunde 1000 Personenwageneinheiten (PWE) zugelassen werden, wobei ein LKW drei Personenwageneinheiten entspricht. Daraus resultiert eine Gesamtkapazität von rund 3000 bis 4000 Lastwagen pro Tag.

Seit 2010 führt das ASTRA vor dem Südportal in Airolo einen Pilotversuch mit einem Thermoportal durch. Dieses Portal kann überhitzte Bauteile an Fahrzeugen feststellen und so verhindern, dass Fahrzeuge, die ein Brandrisiko darstellen könnten, in den Tunnel einfahren. Da die Brandlast eines Lastwagens im Vergleich zu einem PKW wesentlich höher ist, konzentriert sich diese Kontrolle auf LKW.

D Erläuterungen zu den Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr

Die in Kapitel 3.2 Tabelle A Spalte 20 der Stoffliste des ADR aufgeführten Nummern zur Kennzeichnung der Gefahr haben folgende Bedeutung:

20	erstickendes Gas oder Gas, das keine Zusatzgefahr aufweist
22	tiefgekühlt verflüssigtes Gas, erstickend
223	tiefgekühlt verflüssigtes Gas, entzündbar
225	tiefgekühlt verflüssigtes Gas, oxidierend (brandfördernd)
23	entzündbares Gas
239	entzündbares Gas, das spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
25	oxidierendes (brandförderndes) Gas
26	giftiges Gas
263	giftiges Gas, entzündbar
265	giftiges Gas, oxidierend (brandfördernd)
268	giftiges Gas, ätzend
30	– entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C) oder – entzündbarer flüssiger Stoff oder fester Stoff in geschmolzenem Zustand mit einem Flammpunkt über 60 °C, auf oder über seinen Flammpunkt erwärmt, oder – selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff
323	entzündbarer flüssiger Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X323	entzündbarer flüssiger Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
33	leicht entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt unter 23 °C)
333	pyrophorer flüssiger Stoff
X333	pyrophorer flüssiger Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
336	leicht entzündbarer flüssiger Stoff, giftig
338	leicht entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend
X338	leicht entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
339	leicht entzündbarer flüssiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
36	entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), schwach giftig, oder selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff, giftig
362	entzündbarer flüssiger Stoff, giftig, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X362	entzündbarer flüssiger Stoff, giftig, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
368	entzündbarer flüssiger Stoff, giftig, ätzend
38	entzündbarer flüssiger Stoff (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), schwach ätzend, oder selbsterhitzungsfähiger flüssiger Stoff, ätzend
382	entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X382	entzündbarer flüssiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert ³⁾ und entzündbare Gase bildet
39	entzündbarer flüssiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
40	entzündbarer fester Stoff oder selbsterhitzungsfähiger Stoff oder selbstzersetzlicher Stoff
423	fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet, oder entzündbarer fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet, oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X423	fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet, oder entzündbarer fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet,

	oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
43	selbstentzündlicher (pyrophorer) fester Stoff
X432	selbstentzündlicher (pyrophorer) fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und entzündbare Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
44	entzündbarer fester Stoff, der sich bei erhöhter Temperatur in geschmolzenem Zustand befindet
446	entzündbarer fester Stoff, giftig, der sich bei erhöhter Temperatur in geschmolzenem Zustand befindet
46	entzündbarer oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, giftig
462	fester Stoff, giftig, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X462	fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert ³⁾ und giftige Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
48	entzündbarer oder selbsterhitzungsfähiger fester Stoff, ätzend
482	fester Stoff, ätzend, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
X482	fester Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert und ätzende Gase bildet Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
50	oxidierender (brandfördernder) Stoff
539	entzündbares organisches Peroxid
55	stark oxidierender (brandfördernder) Stoff
556	stark oxidierender (brandfördernder) Stoff, giftig
558	stark oxidierender (brandfördernder) Stoff, ätzend
559	stark oxidierender (brandfördernder) Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
56	oxidierender (brandfördernder) Stoff, giftig
568	oxidierender (brandfördernder) Stoff, giftig, ätzend
58	oxidierender (brandfördernder) Stoff, ätzend
59	oxidierender (brandfördernder) Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
60	giftiger oder schwach giftiger Stoff
606	ansteckungsgefährlicher Stoff
623	giftiger flüssiger Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
63	giftiger Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C)
638	giftiger Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), ätzend
639	giftiger Stoff, entzündbar (Flammpunkt nicht über 60 °C), der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
64	giftiger fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig
642	giftiger fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
65	giftiger Stoff, oxidierend (brandfördernd)
66	sehr giftiger Stoff
663	sehr giftiger Stoff, entzündbar (Flammpunkt nicht über 60 °C)
664	sehr giftiger fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig
665	sehr giftiger Stoff, oxidierend (brandfördernd)
668	sehr giftiger Stoff, ätzend
X668	sehr giftiger Stoff, ätzend, der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
669	sehr giftiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
68	giftiger Stoff, ätzend
69	giftiger oder schwach giftiger Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
70	radioaktiver Stoff
78	radioaktiver Stoff, ätzend
80	ätzender oder schwach ätzender Stoff
X80	ätzender oder schwach ätzender Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert

	Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
823	ätzender flüssiger Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
83	ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C)
X83	ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
839	ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
X839	ätzender oder schwach ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C), der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann und der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
84	ätzender fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig
842	ätzender fester Stoff, der mit Wasser reagiert und entzündbare Gase bildet
85	ätzender oder schwach ätzender Stoff, oxidierend (brandfördernd)
856	ätzender oder schwach ätzender Stoff, oxidierend (brandfördernd) und giftig
86	ätzender oder schwach ätzender Stoff, giftig
88	stark ätzender Stoff
X88	stark ätzender Stoff, der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
883	stark ätzender Stoff, entzündbar (Flammpunkt von 23 °C bis einschließlich 60 °C)
884	stark ätzender fester Stoff, entzündbar oder selbsterhitzungsfähig
885	stark ätzender Stoff, oxidierend (brandfördernd)
886	stark ätzender Stoff, giftig
X886	stark ätzender Stoff, giftig, der mit Wasser gefährlich reagiert Wasser darf nur im Einverständnis mit Sachverständigen verwendet werden
89	ätzender oder schwach ätzender Stoff, der spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann
90	umweltgefährdender Stoff; verschiedene gefährliche Stoffe
99	verschiedene gefährliche erwärmte Stoffe.

E Kriterien zur Einstufung entsprechend NFPA 704 (Gefahrstoffdiamant)

Tabelle E1: Kriterien zur Einstufung der Gesundheitsgefahren entsprechend NFPA 704 (blaues Feld)

Kurzinformation für Einsatzkräfte	Kriterien
Stufe 4: Stoffe, die unter Gefährdungsbedingungen Letalität verursachen	
<ul style="list-style-type: none"> • Äußerst gefährlich • Jeden Kontakt mit Dämpfen oder Flüssigkeiten ohne speziellen Schutz vermeiden 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Gase; deren LC₅₀-Wert für die akute Inhalationstoxizität ≤ 1000 ppm ist • Stoffe, deren LD₅₀-Wert für die akute orale Toxizität ≤ 5 mg/kg ist
Stufe 3: Stoffe, die unter Gefährdungsbedingungen schwerwiegende oder dauerhafte Beeinträchtigungen verursachen	
<ul style="list-style-type: none"> • Sehr gefährlich • Aufenthalt im Gefahrenbereich nur mit voller Schutzkleidung und Atemgerät 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Gase; deren LC₅₀-Wert für die akute Inhalationstoxizität >1000ppm, jedoch ≤3000ppm ist • Stoffe, deren LD₅₀-Wert für die akute orale Toxizität >5mg/kg, jedoch ≤200mg/kg ist • Tiefgekühlt verflüssigte Gase, die die Haut irreversibel schädigen • unter Druck verflüssigte Gase, deren Siedetemperatur ≤-55°C ist
Stufe 2: Stoffe, die unter Gefährdungsbedingungen temporäre Arbeitsunfähigkeit oder bleibende Beeinträchtigungen verursachen	
<ul style="list-style-type: none"> • Gefährlich • Aufenthalt nur mit Atemgerät und einfacher Schutzkleidung 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Gase; deren LC₅₀-Wert für die akute Inhalationstoxizität >3000ppm, jedoch ≤5000ppm beträgt • Stoffe, deren LD₅₀-Wert für die akute orale Toxizität >50mg/kg, jedoch ≤500mg/kg beträgt • unter Druck verflüssigte Gase, deren Siedetemperatur im Bereich -30°C<T<-55°C liegt
Stufe 1: Stoffe, die unter Gefährdungsbedingungen erhebliche Irritationen verursachen	
<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Gefahren • Atemgerät wird empfohlen 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Gase; deren LC₅₀-Wert für die akute Inhalationstoxizität >5000ppm, jedoch ≤10000ppm beträgt • Stoffe, deren LD₅₀-Wert für die akute orale Toxizität >500mg/kg, jedoch ≤2000mg/kg beträgt
Stufe 0: Stoffe, die unter Gefährdungsbedingungen keine Wirkungen zeigen, mit Ausnahme der Gefahren von beliebigen brennbaren Stoffen	
<ul style="list-style-type: none"> • Ohne besondere Gefahr 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> • Gase; deren LC₅₀-Wert für die akute Inhalationstoxizität >10000ppm beträgt • Stoffe, deren LD₅₀-Wert für die akute orale Toxizität >2000mg/kg beträgt

Tabelle E2: Kriterien zur Einstufung der Brandgefahren entsprechend NFPA (rotes Feld)

Kurzinformation für Einsatzkräfte	Kriterien
Stufe 4: Stoffe, die schnell oder vollständig unter Umgebungsbedingungen verdampfen oder die schnell in Luft dispergieren.	
<ul style="list-style-type: none"> Extrem leichtentzündlich bei allen Temperaturen 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> entzündbare Gase entzündbare tiefgekühlt verflüssigte Stoffe Jeder flüssige oder gasförmige Stoff unter Druck, wobei der flüssige oder gasförmige Stoff einen Flammpunkt unter 22,8 °C und eine Siedetemperatur unter 37,8 °C hat Stoffe, die sich in Gegenwart von Luft spontan entzünden Flüssigkeiten und Feststoffe, die unter nahezu allen Umgebungsbedingungen entzündet werden können
Stufe 3: Stoffe verursachen gefährbringende Atmosphäre bei Einwirkung von Luft bei Umgebungsbedingungen oder werden schnell entzündet unter nahezu allen Bedingungen, auch ohne Einwirkung von Umgebungstemperaturen	
<ul style="list-style-type: none"> Entzündungsgefahr bei normalen Temperaturen 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter 22,8 °C und einer Siedetemperatur bei oder über 37,8 °C oder Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt bei oder über 22,8 °C und unter 100 °C Stoffe, die in Abhängigkeit von ihrem Aggregatzustand oder den Umgebungsbedingungen explosive Gemische mit Luft bilden können und die sehr schnell in Luft dispergiert werden können Stoffe, die extrem schnell verbrennen auf Grund des Sauerstoffgehaltes in der eigenen Struktur (z.B. trockene Nitrocellulose oder Peroxide)
Stufe 2: Stoffe, denen moderat Wärme zugeführt werden muss oder die vergleichsweise hohen Temperaturen ausgesetzt werden müssen, um ein Entzünden herbeizuführen. Stoffe in dieser Kategorie bewirken unter Normalbedingungen keine gefährliche Atmosphäre unter Einwirkung von Luft. Sie können jedoch bei Temperaturen oder bei Wärmezufuhr Gase in derartigen Mengen freisetzen, dass eine gefährliche Atmosphäre entsteht.	
<ul style="list-style-type: none"> Entzündungsgefahr bei Erwärmung 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt bei oder über 37,8 °C und unter 93,4 °C Feststoffe in Form von grobkörnigem Staub, die schnell verbrennen, jedoch keine explosive Mischungen mit Luft verursachen Feststoffe in fasriger oder zerkleinerter Form, die schnell brennen, wie z.B. Baumwolle, Sisal, Hanf feste oder halbfeste Stoffe, die schnell entzündbare Dämpfe abgeben
Stufe 1: Stoffe, die für eine längere Dauer höheren Temperaturen ausgesetzt werden müssen, bevor Entzündung und Verbrennung stattfinden kann	
<ul style="list-style-type: none"> Entzündungsgefahr nur bei Überhitzung 	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none"> Stoffe, die in Luftatmosphäre bei einer Temperatur von 815,5 °C für die Dauer bis zu 5 Minuten brennen Flüssigkeiten, feste und halbfeste Stoffe mit einem Flammpunkt bei oder über 93,4 °C die meisten brennbaren Stoffe

Fortsetzung Tabelle E2:

Stufe 0: Nicht brennbare Stoffe: Stoffe, die in Luftatmosphäre nicht brennen, wenn sie für die Dauer von 5 Minuten einer Temperatur von 815,5 °C ausgesetzt sind

- Keine Entzündungsgefahr unter üblichen Bedingungen

Tabelle E3: Kriterien zur Einstufung der Reaktivität entsprechend NFPA 704 (gelbes Feld)

Kurzinformation für Einsatzkräfte	Kriterien
Stufe 4: Stoffe, die auf Grund ihrer Zusammensetzung eine Explosion oder explosive Zersetzung verursachen können bei Normalbedingungen. Dies sind Stoffe, die instabil sind bei Einwirkung eines lokalen thermischen oder mechanischen Schocks bei Normalbedingungen	
<ul style="list-style-type: none">• Große Explosionsgefahr• Sicherheitszone bilden• Bei Brand gefährdetes Gebiet sofort räumen	
Stufe 3: Stoffe, die auf Grund ihrer Zusammensetzung eine Explosion oder explosive Zersetzung verursachen können, jedoch für eine äußere Quelle benötigen oder erhöhten Temperaturen ausgesetzt sind.	
<ul style="list-style-type: none">• Explosionsgefahr bei Hitzeeinwirkung oder starker Erschütterung durch Schlag• Sicherheitszone bilden• Löschangriffe nur aus sicherer Deckung	beispielsweise: <ul style="list-style-type: none">• Stoffe, die explosiv reagieren bei Kontakt mit Wasser ohne Wärmezufuhr
Stufe 2: Stoffe, die heftig reagieren bei erhöhter Temperatur oder Druck. Dazu zählen Stoffe, die stürmisch mit Wasser reagieren oder explosive Gemische mit Wasser bilden.	
<ul style="list-style-type: none">• Heftige chemische Reaktionen möglich• Verstärkte Schutzmaßnahmen• Löschangriff nur aus sicherem Abstand	
Stufe 1: Stoffe, die nur bei erhöhter Temperatur oder Druck instabil werden	
<ul style="list-style-type: none">• Wird bei Erhitzung instabil• Schutzmaßnahmen erforderlich	
Stufe 0: Stoffe, die auf Grund ihrer Zusammensetzung stabil selbst, selbst in Gegenwart eines Brandes	
<ul style="list-style-type: none">• Unter normalen Bedingungen keine Gefahr	

Besondere Anweisungen:

W Kein Wasser als Löschmittel verwenden

Ox Oxidierende Wirkung

Stoffe der Gefahrklasse 2 mit Tunnelbeschränkungscode B

Bezeichnung	UN- Nummer	Gefahr - zettel	Gefahrendiamant	
Gefahrnummer 23: entzündbares Gas				
n-BUTAN	1011	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
BUT-1-EN oder cis-BUT-2-EN oder trans-BUT-2-EN oder BUTENE, GEMISCH	1012	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
1,1-DIFLUORETHAN (GAS ALS KÄLTEMITTEL R 152a)	1030	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
ETHAN	1035	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
METHYLAMIN, WASSERFREI	1061	2.1	Gesundheitsgefahr 3 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
PETROLEUMGASE, VERFLÜSSIGT	1075	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
PROPEN	1077	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 1	
TRIMETHYLAMIN, WASSERFREI	1083	2.1	Gesundheitsgefahr B 3 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
METHYLCHLORID UND DICHLORMETHAN, GEMISCH	1912	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 2	
VERDICHTETES GAS, ENTZÜNDBAR, N.A.G.	1954	2.1		
ETHYLEN	1962	2.1	Gesundheitsgefahr 2 Brandgefahr 4 Reaktivität 2	
KOHLLENWASSERSTOFFGAS, GEMISCH, VERDICHTET, N.A.G.	1964	2.1		
KOHLLENWASSERSTOFFGAS, GEMISCH, VERFLÜSSIGT, N.A.G. (Gemisch A, A 01, A 02, A 0, A 1, B 1, B 2, B oder C)	1965	2.1	Gesundheitsgefahr 1 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
METHAN, VERDICHTET oder ERDGAS, VERDICHTET, mit hohem Methangehalt	1971	2.1	Gesundheitsgefahr 2 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
PROPAN	1978	2.1	Gesundheitsgefahr 2 Brandgefahr 4 Reaktivität 0	
WASSERSTOFF UND METHAN, GEMISCH, VERDICHTET	2034	2.1		
1,1,1-TRIFLUORETHAN (GAS ALS KÄLTEMITTEL R 143a)	2035	2.1	Gesundheitsgefahr 2 Brandgefahr 4 Reaktivität 2	

Gefahrnummer 223: tiefgekühlt verflüssigtes Gas, entzündbar					
ETHYLEN, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG	1038	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 2	
ETHAN, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG	1961	2.1			
WASSERSTOFF, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG	1966	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	0 4 0	
METHAN, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG oder ERDGAS, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG, mit hohem Methangehalt	1972	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	3 4 0	
ETHYLEN, ACETYLEN UND PROPYLEN, GEMISCH, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG, mit mindestens 71,5 % Ethylen, höchstens 22,5 % Acetylen und höchstens 6 % Propylen	3138	2.1			
GAS, TIEFGEKÜHLT, FLÜSSIG, ENTZÜNDBAR, N.A.G.	3312	2.1			
Gefahrnummer 239: entzündbares Gas, das spontan zu einer heftigen Reaktion führen kann					
ACETYLEN, GELÖST	1001	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	0 4 3	
ETHYLENOXID UND KOHLENDIOXID, GEMISCH mit mehr als 9 %, aber höchstens 87 % Ethylenoxid	1041	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 3	
METHYLACETYLEN UND PROPADIEN, GEMISCH, STABILISIERT (Gemisch P 1) (Gemisch P 2)	1060	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	1 4 2	
TETRAFLUORETHYLEN, STABILISIERT	1081	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	3 4 0	
VINYLCHELORID, STABILISIERT	1086	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 2	
1,1-DIFLUORETHYLEN (GAS ALS KÄLTEMITTEL R 1132a)	1959	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	3 4 0	
ETHYLACETYLEN, STABILISIERT	2452	2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 2	
Gefahrnummer 263: giftiges Gas, entzündbar					
KOHLENMONOXID, VERDICHTET	1016	2.3+2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	3 4 0	
STADTGAS, VERDICHTET	1023	2.3+2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 0	
SCHWEFELWASSERSTOFF	1053	2.3+2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	4 4 0	

ÖLGAS, VERDICHET	1071	2.3+2.1		
VERDICHETES GAS, GIFTIG, ENTZÜNDBAR, N.A.G.	1953	2.3+2.1	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität	2 4 0
DICHLORSILAN	2189	2.3+2.1+8	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität besondere Gefahr	4 4 2 W
METHYLCHLORSILAN	2534	2.3+2.1+8	Gesundheitsgefahr Brandgefahr Reaktivität besondere Gefahr	3 4 2 W
VERDICHETES GAS, GIFTIG, ENTZÜNDBAR, ÄTZEND, N.A.G.	3305	2.3+2.1+8		
VERFLÜSSIGTES GAS, GIFTIG, ENTZÜNDBAR, ÄTZEND, N.A.G.	3309	2.3+2.1+8		