

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder

Arbeitskreis V

Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 158

**UNTERSUCHUNG DER BEDINGUNGEN FÜR DIE FEUERWEHREN BEI
DER BEKÄMPFUNG VON BRÄNDEN IN VERKEHRSTUNNELN UNTER
BERÜCKSICHTIGUNG DER IN DEN RISIKOANALYSEN DER
OECD-PIARC ZUGRUNDELIEGENDEN BRANDSZENARIEN FÜR
VERSCHIEDENE UNFÄLLE**

TEIL 1

von

Dr. rer. nat. Georg Pleß
Dipl.-Chem. Ursula Seliger

Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge

Mai 2009

BERICHTS-KENNBLETT

| | | | |
|--|--|---|---|
| Nummer des Berichtes: <div style="text-align: center;">158</div> | Titel des Berichtes <div style="text-align: center;"> Untersuchung der Bedingungen für die Feuerwehren bei der Bekämpfung von Bränden in Verkehrstunneln unter Berücksichtigung der in den Risikoanalysen der OECD-PIARC zugrundeliegenden Brandszenarien für verschiedene Unfälle </div> | ISSN: <div style="text-align: center;">0170-0060</div> | |
| Autoren: Dr. rer. nat. Georg Pleß Dipl.-Chem. Ursula Seliger | durchführende Institution: <div style="text-align: center;"> Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Prof. Dr. rer. nat. habil. Reinhard Grabski </div> | | |
| Nummer des Auftrages: <div style="text-align: center;">61 (3/2008)H</div> | auftraggebende Institution: <div style="text-align: center;"> Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung </div> | | |
| Datum des Berichtes: <div style="text-align: center;">31.05.2009</div> | | | |
| Seitenzahl: <div style="text-align: center;">127</div> | Bilder: <div style="text-align: center;">37</div> | Tabellen: <div style="text-align: center;">35</div> | Literaturverweise: <div style="text-align: center;">84</div> |
| Kurzfassung: <p> Ausgehend von den vorliegenden internationalen Erkenntnissen zu Tunnelereignissen wurden die Gefährdungen, die in Tunneln auftreten können, bewertet. Es wurden Einsatzszenarien für die Feuerwehren abgeleitet, die vom Unfall bis zum Freistrahbrand eines freigesetzten Flüssiggases alle möglichen Ereignisse umfassen. Diese Ereignisse wurden so aufbereitet, dass die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehren aus der Sicht der verfügbaren Löschmittel, der Begrenzung der Zeitschiene durch die Ereignisentwicklung, der Einflüsse durch das Ereignis auf die Einsatzkräfte und die Umgebung verdeutlicht wurden. Im Rahmen der taktischen Maßnahmen bei verschiedenen Einsatzszenarien wurde deutlich, dass die Möglichkeiten der Feuerwehr bereits bei mittleren Szenarien für Brände und Stofffreisetzungen ihre Grenzen erreichen. Bei Freisetzungen von Gasen mit Explosionsfolge und BLEVE sind durch die Feuerwehren keine Maßnahmen zur Minderung der Konsequenzen möglich. Zu den abgeleiteten Einsatzszenarien wurden taktische Arbeitsvorschriften erarbeitet. </p> | | | |
| Schlagwörter: Tunnel, Tunnelkategorien, Gefahrgut, Ereignisszenario, Brandbekämpfung, Brandbekämpfungsszenario, Brandbekämpfungsanlagen, Arbeitsvorschriften | | | |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 2 | GEFAHREN IN TUNNELN..... | 1 |
| 2.1 | GRUNDSÄTZLICHE AUSSAGEN | 1 |
| 2.2 | EREIGNISSZENARIEN..... | 3 |
| 3 | EREIGNISSZENARIEN..... | 9 |
| 3.1 | TUNNELBRÄNDE..... | 9 |
| 3.1.1 | Belüftungsbedingungen in Tunneln | 9 |
| 3.1.2 | Brandentwicklung bei Tunnelbränden..... | 15 |
| 3.1.3 | Brandübertragung | 19 |
| 3.1.4 | Auswirkung unterschiedlicher Belüftungsmethoden | 21 |
| 3.1.5 | Wärmestrahlung..... | 24 |
| 3.1.6 | Wärmefreisetzungsraten bei Bränden in Tunneln | 26 |
| 3.1.7 | Einfluss von Verkehr und Ladung bei Tunnelbränden..... | 29 |
| 3.1.8 | Gefahrgüter bei Bränden..... | 32 |
| 3.2 | EXPLOSIONEN DURCH GASFREISETZUNG ODER DAMPFBILDUNG..... | 35 |
| 3.2.1 | BLEVE und VCE – Explosion | 35 |
| 3.2.2 | Gefahren durch Gaswolkenexplosionen..... | 36 |
| 3.2.3 | Einfluss des Zündzeitpunktes | 38 |
| 3.3 | FREISETZUNG TOXISCHER STOFFE | 39 |
| 3.3.1 | Beurteilungswerte toxischer Stoffe | 39 |
| 4 | BEEINFLUSSUNG DER GEFÄHRDUNGSSZENARIEN DURCH TECHNISCHE MAßNAHMEN..... | 41 |
| 4.1 | LÜFTUNG UND VERBRENNUNG..... | 41 |
| 4.1.1 | Grundsätzliche Aussagen | 41 |
| 4.1.2 | Ergebnisse der Literatur..... | 41 |
| 4.2 | BRANDAUSBREITUNG ÜBER DIE SCHLITZRINNE | 43 |
| 4.3 | LÖSCHEN BRENNBARER FESTER UND FLÜSSIGER STOFFE | 44 |
| 4.3.1 | Ergebnisse der Untersuchungen an festen Stoffen (Brandklasse A) | 45 |
| 4.3.2 | Ergebnisse der Untersuchungen an brennbaren Flüssigkeiten (Brandklasse B)..... | 48 |
| 4.4 | LÖSCHANLAGEN | 51 |
| 4.5 | MOBILE LÖSCHWASSERVERSORGUNG | 59 |
| 4.6 | SONSTIGE LÖSCHGERÄTE | 66 |
| 4.7 | SCHUTZAUSRÜSTUNG FÜR EINSATZKRÄFTE | 66 |
| 4.8 | WEITERE TECHNISCHE MITTEL | 67 |
| 5 | SZENARIEN FÜR DIE FEUERWEHREN BEI UNFÄLLEN IN TUNNELN..... | 67 |
| 5.1 | EREIGNISSE UND FOLGESZENARIEN FÜR DIE FEUERWEHREN | 67 |
| 5.2 | BESCHREIBUNG DER EINSATZSZENARIEN | 69 |
| 5.2.1 | Unfallszenarien | 69 |
| 5.2.2 | Freisetzungsszenarien | 69 |
| 5.2.3 | Brandszenarien | 71 |
| 5.2.3.1 | Brandszenarien mit normalen Brandstoffen..... | 71 |
| 5.2.3.2 | Brandszenarien mit flüssigen Gefahrgütern..... | 72 |
| 5.2.3.3 | Brandszenarien mit brennbaren Gasen | 73 |
| 5.2.3.4 | Brände mit toxischen brennbaren Stoffen..... | 74 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | BEWERTUNG DER EINSATZSCENARIEN | 74 |
| 5.4 | SCHAFFUNG OPTIMALER EINSATZBEDINGUNGEN | 77 |
| 5.4.1 | Große und sehr große Explosionen | 77 |
| 5.4.2 | Freisetzungen toxischer und brennbarer Gase und Dämpfe | 77 |
| 5.4.3 | Große Brände brennbarer Flüssigkeiten..... | 78 |
| 5.4.4 | Brände von Stoffen, die nicht dem ADR unterliegen (Heavy Goods)..... | 79 |
| 5.4.5 | Kleine Brände von Gefahrgütern | 79 |
| 6 | GRENZEN DER FEUERWEHREN BEI EINSÄTZEN..... | 80 |
| 6.1 | HILFELEISTUNGSEINSATZ | 80 |
| 6.2 | EINSATZ BEI FREISETZUNGEN..... | 80 |
| 6.3 | LÖSCHEINSATZ | 80 |
| 6.4 | ABLEITUNGEN AUS DER HRR BEI LÖSCHEINSÄTZEN | 82 |
| 6.5 | BESTIMMENDE FAKTOREN FÜR DIE EINSATZGRENZEN - FAZIT | 83 |
| 6.6 | EINSATZGRENZEN BEI STATIONÄREN BRANDBEKÄMPFUNGSANLAGEN | 84 |
| 7 | ARBEITSVORSCHRIFTEN BEI EINSÄTZEN IN TUNNELN | 86 |
| 7.1 | ZIELSTELLUNG DER ARBEITSVORSCHRIFTEN | 86 |
| 7.2 | STANDARD-EINSATZ-REGELN TUNNEL (SER) | 86 |
| 8 | LITERATUR | 113 |

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE UND INDIZIES

| Abkürzung | Erläuterung |
|------------------|---|
| ADR | Accord Européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route, Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße |
| AEGL | Acute Exposure Guidelines Levels, Richtlinien zu akuten Belastungsgrenzen |
| AFFF | Aqueous Film Forming Faom, Filmbildendes Schaummittel |
| ALARP | As Low As Reasonably Practicable, so niedrig, wie vernünftiger Weise praktikabel |
| BAB | Bundesautobahn |
| BLEVE | Boiling Liquid Expanding Vapour Cloud Explosion, Gasexplosion einer expandierenden siedenden Flüssigkeit |
| CAFS | Compressed Air Foam System, Druckluftschäum-System |
| ERPG | Emergency Response Planning Guidelines, Richtlinien zur Notfallschutzplanung |
| ETW | Einsatztoleranzwert |
| DG | Dangerous Goods, Gefahrgüter |
| HGV | Heavy Goods Vehicle, Lastkraftwagen |
| HC | Hydrocarbon, Kohlenwasserstoff |
| HRR | Heat Release Rate, Wärmefreisetzungsrate |
| LPG | Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas |
| OECD | Organisation for Economic Co-operation and Development, Organisation für ökonomische Zusammenarbeit und Entwicklung |
| ORT | Occupant Response Time, Reaktionszeit der Fahrzeuginsassen |
| PE | Polyethylen |
| QRA | Quantitative Risk Assessment, Quantitative Risikobewertung |
| GRAM | Quantitative Risk Assessment Model, Modell zur quantitativen Risikobewertung |
| MBS | Mehrbereichsschaummittel |
| RABT | Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln |
| RWS | Rijkswaterstaat, Behörde im niederländischen Ministerium für Verkehr und Wasserbau |
| TNO | TNO Institute of Environmental and Energy Technology, Apeldoorn, Niederlande |
| UVCE | Unconfined Vapour Cloud Explosion, Unverdämmte Dampf- oder Gaswolkenexplosion |
| UK | United Kingdom, Vereinigtes Königreich (Großbritannien und Nordirland) |
| VCE | Vapour Cloud Explosion, (Verdämmte) Dampf- oder Gaswolkenexplosion |
| Symbole | Erläuterung |
| a | Anteil der Verbrennungsenthalpie zur Bildung der Schockwelle |
| A | Fläche, Querschnittsfläche, (m ²) |
| A_{Brd} | Brandfläche, (m ²) |
| c_p | spezifische Wärme, (J/kgK) |
| E_{O_2} | freigesetzte Energie nach der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie, Konstante 13,1 MJ/kg Sauerstoff |

| | |
|-----------------|--|
| d_{Fb} | Durchmesser eines Feuerballes (Explosion), (m) |
| D_{Fb} | Lebensdauer eines Feuerballes (Explosion), (s) |
| ΔH_H | Heizwert (Verbrennungsenergie bei konstantem Druck und Volumen), (MJ/kg) |
| ΔH_V | Verdampfungsenthalpie, (kJ/kg) |
| ΔH_Z | Zersetzungs- oder Pyrolyseenthalpie, (kJ/kg) |
| \dot{m}_{O_2} | Sauerstoffmassenstrom im Luftstrom, (kg/s) |
| \dot{Q}_{Brd} | Brandleistung, Wärmefreisetzungsrate (HRR), (MW) |
| \dot{m}_{Brd} | Brandstoffmassenstrom, (kg/s) |
| \dot{m}_{ver} | Massenstrom bei Verdampfung, (kg/s) |
| m | Masse, (kg) |
| m_D | Masse an Flüssigkeitsdampf, (kg) |
| m_{Fl} | Masse an Flüssigkeit, (kg) |
| r_{Brd} | Abbrandrate, (kg/m ² s) |
| P | Druck, (Pa) |
| R | Gaskonstante, $R = 8,32 \text{ J/K mol}$ |
| r | Radius, (m) |
| v | Geschwindigkeit, (m/s) |
| v_W | Windgeschwindigkeit, (m/s) |
| z | normierter Abstand, (m/kg) ^{1/3} |
| α | Brandausbreitungsfaktor, quadratisch (kW/s ²), linear (kW/s) |
| χ | Faktor zur Effizienz der Verbrennung |
| ϑ | Temperatur, (°C) |

| Indizes | Erläuterung |
|----------------|--------------------------------|
| Brd | Brandstoff |
| max | Höchstwert |
| D | Beginn der Ausbrennperiode |
| d | Branddauer |
| g | Brandausbreitungsperiode |
| HC | Hydrocarbon, Kohlenwasserstoff |
| Fb | Flammenbrand |
| L | Luft |
| La | Lache |
| q | quadratische Periode |
| Sdp | Siedepunkt |
| tot | Gesamtsumme |
| Tun | Tunnel |
| U | Umgebung |
| Ver | Verbrennung |
| W | Wind |
| Z | Zersetzung |

VERZEICHNIS DER GLEICHUNGEN

| Gleichung | Nummer |
|---|--------|
| $\dot{m}_{O_2} = \frac{81,9 \cdot v_L \cdot A_{Tun}}{T_U}$ | (1) |
| $\dot{Q}_{Brd} = HRR = \dot{m}_{O_2} \cdot E_{O_2}$ | (2) |
| $\dot{m}_{Brd} = \frac{\dot{Q}_{Brd}}{\Delta H_{H,Brd}}$ | (3) |
| $A_{Brd} = \frac{\dot{m}_{Brd}}{0,9 \cdot r_{Brd}}$ | (4) |
| $Q_{12} = A_1 \phi_{12} C_s \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$ | (5) |
| $Q_{tot} = \dot{Q}_{max} = c \cdot HRR$; $c_{pkw} = 0,868 MW / GJ$ und $c_{HGV} = 0,866 MW / GJ$ | (6) |
| $\dot{Q}_{Brd} = HRR = A_{Brd} \cdot r_{Brd} \cdot \chi \cdot \Delta H_H$ | (7) |
| $m_D = m_{Fl} \left(1 - e^{-\frac{c_p}{\Delta H_V} (T_U - T_{Sdp})} \right)$ | (8) |
| $\ln \frac{p_U}{p_{Sdp}} = \frac{\Delta H_V}{R} \left(\frac{1}{T_{Sdp}} - \frac{1}{T_U} \right)$ | (9) |
| $m_{ver}^* = -0,024 \frac{v_W \cdot M \cdot A_{La}}{r_{La} \cdot (273,15 + \vartheta_{La})} \cdot \ln \left(1 - \frac{p_{La}}{1,013215} \right)$ | (10) |
| $TNT_{\ddot{a}q} = \frac{a \cdot \Delta H_{H,HC} \cdot m_{HC}}{\Delta H_{H,TNT}}$ | (11) |
| $z = \left(\frac{r}{TNT_{\ddot{a}q}} \right)^{\frac{1}{3}}$ | (12) |
| $d_{Fb} = 6,48 \cdot m_{Brd}^{0,325}$ | (13) |
| $D_{Fb} = 0,852 \cdot m_{Brd}^{0,26}$ | (14) |
| $\frac{\dot{m}_W}{\dot{m}_0} = 1 + 0,15 \frac{u}{D}$ | (15) |

1 Einleitung

Die Feuerwehren werden bei der Bekämpfung von Unfällen mit und ohne Brandfolge hinsichtlich ihrer physischen Leistungsfähigkeit und der Wirksamkeit ihrer Technik an Grenzen geführt, die nur unter Beachtung aller Einflussfaktoren und Nutzung effizienter Methoden bewältigt werden können.

Die Vielzahl der Untersuchungen zu Bränden und Unfällen in Tunneln zeigten die Probleme auf. Allerdings ist es erforderlich darauf zu verweisen, dass diese Untersuchungen grundsätzlich auf die Anfangsphase der Brandentwicklung fokussiert waren. Nur wenige Untersuchungen haben sich gezielt mit dem vollentwickelten Brandregime befasst. Dies ist auch verständlich, weil die vorrangigen Ziele auf den Schutz des Lebens von Tunnelbenutzern ausgerichtet sind, deren Überleben durch Evakuierung nur während der Brandentwicklungsphase möglich ist sowie der Verhinderung von Schäden an der Struktur des Tunnels dienen. Die ermittelten Parameter zeigten, dass Brände und auch Unfälle im Vergleich zu den Ereignissen in Wohn-, Lager- oder Produktionsbereichen deutliche Abweichungen aufwiesen.

In dieser Arbeit sollen ausgehend von den in internationalen Publikationen präsentierten Forschungsergebnissen die zu erwartenden Grenzwerte abgeleitet werden, die von den Feuerwehren beachtet werden müssen, um eine effiziente Arbeit bei der Beseitigung der Gefahren innerhalb von Tunneln zu leisten. Es können im Rahmen dieser Arbeit keine kompletten Experimente zum Löschen großer Brände vorgenommen werden, weil der notwendige Aufwand zu groß wäre. Die Zielstellung wird so ausgerichtet, dass aus den verfügbaren Forschungsarbeiten Grenzwerte für die Belastung der Einsatzkräfte während des Einsatzes abgeleitet werden. An Hand dieser Grenzwerte sollen technische und taktische Maßnahmen für den Schutz der Einsatzkräfte und das effiziente Handeln abgeleitet werden. In die Betrachtung sollen sowohl Brände unterschiedlicher Materialien einschließlich Gefahrgüter als auch Unfälle mit gefährlichen Stoffen einbezogen werden. Zielstellung ist, dass für eine unterschiedliche Anzahl von Brandszenarien und Unfälle

- ◆ die wesentlichen Grenzwerte,
- ◆ eine Charakterisierung der Gefahren,
- ◆ die möglichen taktischen Maßnahmen,
- ◆ die erforderlichen technischen Ausrüstungen und Hilfsmittel,
- ◆ die persönlichen Schutzmaßnahmen

bestimmt und in den Vorgaben für die Beseitigung der Gefahren ausführlich beschrieben werden. Die Vorgaben sollen sowohl für den Einsatzleiter als auch vor allem für die Einsatzkräfte vor Ort gelten und gleichzeitig die Ausführung gezielter Trainings- und Übungsmethoden ermöglichen.

2 Gefahren in Tunneln

2.1 Grundsätzliche Aussagen

Verkehrsunfälle stellen auch in Tunneln die Ursache für Gefahrenereignisse dar. Diese Unfälle sind keine Probleme für Feuerwehr und Rettungsdienste, wenn sie ohne jegliche Freisetzung von brennbaren, explosiblen oder anderen Stoffen ablaufen, die Gefahren hervorrufen können. Entstehen allerdings im Rahmen eines Unfalles sekundäre Gefahrenereignisse, können diese in Tunneln erhebliche Auswirkungen besitzen.

Zunächst stellen sich bei Gefahrenereignissen Fragen nach ihren Erscheinungsformen, dem allgemeinen Ablauf und ihrer näheren Charakterisierung. In Anlehnung an [Koinig 1999] werden in der nachfolgenden Tabelle 1 diese Fragen beantwortet.

Tabelle 1: Erscheinungsform, Ablauf und Charakterisierung von Gefahrenereignissen

| Ablauf | Kriterien | Hilfsmittel |
|--|--|--|
| Auslösendes Ereignis | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Freisetzung ◆ Brand ◆ Explosion | |
| Eigenschaften zur Charakterisierung der Gefahren | <ul style="list-style-type: none"> ◆ chemische ◆ physikalische ◆ sicherheitstechnische ◆ brandschutztechnische | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Sicherheitsdatenblatt ◆ Beschreibung durch Hersteller/Lieferant ◆ Datenbanken und Nachschlagewerke |
| Ausbreitungspfad | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Boden ◆ Wasser ◆ Luft | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Digitale Karten ◆ Meteorologische Daten ◆ Gewässerkarten |
| Wirkungsradius | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Aggregatzustand ◆ Freisetzungsart ◆ Stoffmenge ◆ Wetter / Wind | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Ausbreitungsabschätzung z.B. DISMA, MET ◆ Tabellen |
| Umgebung | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Topographie ◆ Siedlungsdichte ◆ Besondere Objekte | <ul style="list-style-type: none"> ◆ DISMA ◆ Katasterplan |
| Konsequenzen | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Mensch ◆ Ökologie ◆ Infrastruktur | |

Wenn Freisetzungen keine zusätzlichen Ereignisse nach sich ziehen, sind in diesen Fällen unter Berücksichtigung der chemischen und physikalischen Eigenschaften vor allem der Wirkungsradius und die Konsequenzen abzuschätzen (vgl. Tabelle 2). Die sicherheits- und brandschutztechnischen Eigenschaften sind bei Freisetzungen insofern von Bedeutung, dass brennbare und leichtflüchtige Stoffe deutlich nach der eigentlichen Freisetzung zu den Folgeereignissen Brand und Explosion führen können.

Tabelle 2: Einflussgrößen und Parameter bei Freisetzungen

| | bestimmende Größen | Einflussparameter |
|-------------|--|---|
| Freisetzung | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Leckart und Größe ◆ Leckrate ◆ Lachengröße ◆ Verdampfungsrate ◆ Flashverdampfung | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Leckage ◆ Aggregatzustand ◆ Verdampfungsrate |
| Wirkung | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Schadstoffkonzentration | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Quelle ◆ Dichte ◆ Geländeart ◆ Wind ◆ Meteorologische Bedingungen ◆ Akute Toxizität ◆ Brennbarkeit ◆ Explosionsfähigkeit |
| Folgen | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Bevölkerung ◆ Umwelt | <ul style="list-style-type: none"> ◆ Bevölkerungsdichte ◆ Exposition ◆ Schutzgrad ◆ Grundwasser ◆ Durchlässigkeit der Schichten |

Brände und Explosionen stellen zusätzliche höhere Gefahren dar, die abhängig von ihren Ausmaßen für die Gefahrenabwehr hohe Anstrengungen erfordern. Wird die Größe bestimmter Szenarien überschritten, werden die Einsatzkräfte sowohl bei Bränden und noch stärker bei Explosionen keine reale Möglichkeit des Eingreifens mehr haben. Bei der Beurteilung von Bränden und Explosionen sollten die Ereignisse noch weiter untergliedert werden.

Tabelle 3: Unfallszenarien für brennbare und explosive Stoffe

| Gefahrenpotential | Brennbare und explosive Stoffe | | | |
|-------------------|--|---|--|---|
| Ereignis | Brand und Explosion | | | |
| Aggregatzustand | fest | flüssig | flüssig/gasförmig | gasförmig |
| Auswirkungen | Feststoffbrand Staubexplosion Explosivstoffe | Lachenbrand Tankbrand (Pool) Freistrahbrand | Feuerball „BLEVE“ Boil-over Freistrahbrand | Freistrahbrand/Flashfeuer, Gaswolkenbrand Deflagration UVCE ¹ = unverdämmte Gaswolkenexplosion VCE ² = verdämmte Gaswolkenexplosion |

Diese allgemeinen Betrachtungen in Anlehnung an [Koinig 1999] zeigen, dass es für Gefahrenereignisse real nur drei Gruppen gibt

- ◆ den Brand,
- ◆ die Freisetzung von Stoffen und
- ◆ die Explosion.

2.2 Ereignisszenarien

Zur Einschätzung der Risiken bei Schadensereignissen in Tunneln wurden spezifische Methoden entwickelt, denen sowohl experimentelle Untersuchungen als auch die Erfahrungen aus einer Vielzahl einzelner Ereignisse zugrunde liegen. Gegenstand der Untersuchungen waren vor allem wesentliche Einflussparameter im Hinblick auf die

- ◆ Verringerung der Gefährdung von Personen, ihre schnelle und sichere Rettung aus dem Gefahrenbereich,
- ◆ Erhaltung der Struktur des Bauwerkes, sowie Ableitung von Grenzwerten der Belastbarkeit von Mauern, Decken und Fahrbahnen,
- ◆ Verbesserung der technischen Ausrüstung der Tunnel, insbesondere der Belüftung durch Abführung von Reaktionswärme von Bränden und Beeinflussung der natürlichen Ausbreitung von toxischen Rauchgasen,
- ◆ Steigerung der Sicherheit bei der Selbstrettung von Tunnelnutzern durch Notausgänge, Flucht- und Rettungswege, Notbeleuchtung, Erste Hilfe und Handlöschgeräte,
- ◆ Wirksamkeit automatischer Brandunterdrückungsanlagen auf die Selbstrettungschancen von Personen, Erhaltung der Bauwerksstruktur, Verringerung der Temperaturen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrzeugattrappen durchgeführt. Als Brandstoffe kamen Materialien zum Einsatz, die im Fahrzeugbau Verwendung finden und solche, die häufig als Transportgut auf den Fahrzeugen vertreten sind. Die Untersuchungen wurden sowohl als Großversuche im Realmaßstab (full-scale) als auch in verkleinerten Maßstäben (small scale) durchgeführt. Viele Abhängigkeiten der Parameter wurden unter Nutzung von Simulationsmodellen umfassend herausgearbeitet. Der Stand der Technik bezüglich der komplexen Vorgänge bei Ereignissen in Tunneln ist, eine Reihe

¹ UVCE Unconfined Vapour Cloud Explosion; Explosion im Freien ohne irgendwelche Verbauungen, Hindernisse u.a.

² VCE Confined Vapour Cloud Explosion; Explosion in Gebäuden, Tunneln u.a.

von Ereignisszenarien vorzugeben, die in wesentlichen Punkten international abgeglichen sind. Diese Ereignisszenarien dienen gegenwärtig dazu auf der Basis des Gefahrguttransportes, die vorhandenen Tunnel und zukünftige Tunnelprojekte einer sogenannten quantitativen Risikoanalyse zu unterziehen, um speziell für Tunnel die vorhandenen Risiken einzuschätzen [ITIG 2006]. Das sogenannte ALARP-Prinzip (As Low As Reasonably Practicable) bezeichnet ein Risiko, das aus verschiedenen Aspekten (Gesellschaft, Individuum, Umwelt, Besitztum) abgeleitet wird. Das ALARP-Prinzip besagt, dass es im quantitativen Risikomanagement drei Kategorien gibt [Home Office 1998]:

- ◆ Kategorie des vernachlässigbaren Risikos. Ein zusätzlicher Aufwand zur Risikominderung ist nicht erforderlich.
- ◆ Kategorie des tolerierbaren Risikos. In dieser Kategorie kann das Risiko gemindert werden. Die Maßnahmen der Verminderung sollten dabei aber in einem kostenmäßig vertretbaren Rahmen bleiben
- ◆ Kategorie des nicht tolerierbaren Risikos. In dieser Kategorie muss schnellstens auch unter kostenaufwändigen Maßnahmen das vorhandene Risiko abgesenkt werden. Ziel ist, zumindest den tolerierbaren Risikobereich zu erreichen.

Für die Erstellung von Quantitativen Risikobewertungen (QRA) für Straßentunnel empfiehlt die [OECD 2001] 13 verschiedene Szenarien (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ereignisszenarien für Tunnel nach [OECD 2001]

| Szenario | Beschreibung | Kapazität | Leckgröße mm | Massenflussrate kg/s |
|----------|---|-----------|--------------|----------------------|
| 1 | HGV Brand 20 MW (fest, brennbar) | - | - | - |
| 2 | HGV Brand 100 MW (fest, brennbar) | - | - | - |
| 3 | BLEVE von LPG-Gas (Flüssiggas) Gasflasche | 50 kg | - | - |
| 4 | Vergaserkraftstoff Poolbrand (flüssig) | 28 t | 100 | 20,6 |
| 5 | VCE Vergaserkraftstoff (flüssig, gasförmig) | 28 t | 100 | 20,6 |
| 6 | Chlorfreisetzung (gasförmig, flüssig) | 18 t | 50 | 45 |
| 7 | BLEVE von LPG Tank (gasförmig, flüssig) | 18 t | - | - |
| 8 | VCE LPG Tank (gasförmig, flüssig) | 18 t | 50 | 36 |
| 9 | Fackelfeuer LPG Tank (gasförmig) | 18 t | 50 | 36 |
| 10 | Ammoniakfreisetzung (gasförmig, flüssig, brennbar, toxisch) | 20 t | 50 | 36 |
| 11 | Acrolein, Tankwagen (flüssig, brennbar, toxisch) | 25 t | 100 | 24,8 |
| 12 | Acrolein, Gasflasche | 100 l | 4 | 0,02 |
| 13 | BLEVE Kohlendioxid (toxische Effekte nicht eingeschlossen) | 20 t | - | - |

Legende:

| | | | | | |
|-----------|--------------------|---|------------------------|------------------------------|--------------------|
| Gefahrgut | Brand normales Gut | Brand Gefahrgut mit Explosion (Flüssiggas) | Freisetzung toxisch | Physikalische Freisetzung | Brand Gefahrgut |
|-----------|--------------------|---|------------------------|------------------------------|--------------------|

Die Liste enthält 2 Szenarien für Brände mit normalem Transportgut (1; 2) und eine physikalische (explosionsartige) Freisetzung (13). Zwei verschiedene Brandszenarien wurden berücksichtigt (4; 9). Für Explosionen wurden vier Szenarien zusammengestellt und für Freisetzungen mit toxischen Verbindungen gibt es ebenfalls vier Szenarien. Elf der dreizehn Szenarien haben somit Ereignisse beim Transport von Gefahrgütern zum Inhalt.

Von der [OECD 2001] wird weiterhin empfohlen, diese Ereignisszenarien entsprechend der Übersicht in Tabelle 5 in Gruppen zusammenzufassen.

Tabelle 5 Zuordnung der Szenarien zu Gruppen

| | |
|----------|---|
| Gruppe E | Brände von Lastkraftwagen mit ungefährlichen Stoffen (20 MW) Brände von Lastkraftwagen mit ungefährlichen Stoffen (100 MW) |
| Gruppe D | zusätzlich zu Szenarien der Gruppe E: BLEVE* von flüssigem Petroleumgas (LPG) in Druckflaschen (50kg) Freisetzung von Acrolein aus Druckflaschen |
| Gruppe C | zusätzlich zu Szenarien der Gruppe D: Brand von Benzinflächen aus Tankfahrzeugen Dampfwolkenexplosion (VCE) von Benzin aus Tankfahrzeugen |
| Gruppe B | zusätzlich zu Szenarien der Gruppe C: Freisetzung von Ammoniak aus Tankcontainern Freisetzung von Chlor aus Tankcontainern Freisetzung von Acrolein aus Tankcontainern BLEVE von Kohlendioxid aus Tankcontainer ohne toxische Wirkungen |
| Gruppe A | zusätzlich zu Szenarien der Gruppe B: BLEVE von Flüssiggas (LPG) aus Tankfahrzeugen Dampfwolkenexplosion (VCE) von Flüssiggas aus Tankfahrzeugen Freistrahbrand von Flüssiggas aus Tankfahrzeugen |

Aus dieser Zuordnung der Szenarien lässt sich folgendes Schema für die Einstufung von Gefahrenereignissen in Tunneln ableiten:

- ◆ normale Brände (nicht deklarierpflichtige Güter)
- ◆ kleine Dampfwolkenexplosionen und begrenzte Freisetzungen toxischer Produkte
- ◆ große Brände brennbarer Flüssigkeiten und Dampfwolkenexplosion (verzögerte Zündung)
- ◆ Freisetzungen toxischer Flüssiggase und große Dampfwolkenexplosion ohne Zündung und toxische Wirkung (unbrennbare und nicht toxische Gase)
- ◆ große Reaktionen von Flüssiggasen (BLEVE, VCE, Freistrahbrand)

Gemäß ADR 2007 (Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße) müssen bis spätestens Ende 2009 alle Tunnel kategorisiert werden. Einschränkungen sind unter Berücksichtigung von Eigenschaften, Risiko, Alternativen, Verkehrsleitung, in mehreren Kategorien möglich.

Tabelle 6: Kategorien zur Beschränkung gefährlicher Güter in Tunneln [ADR 2007]

| Kategorie | Beschränkung |
|-----------|---|
| A | keine Beschränkung für gefährliche Güter (für UN 2919 und 3331 siehe ADR 8.6.3.1) |
| B | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer <ul style="list-style-type: none"> ◆ <i>sehr großen Explosion</i> führen können. |
| C | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> ◆ <i>sehr großen Explosion ("B"-Güter)</i> ◆ <i>großen Explosion</i> ◆ <i>umfangreiches Freiwerden giftiger Stoffe</i> führen können. |
| D | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> ◆ <i>sehr großen Explosion ("B"-Güter)</i> ◆ <i>großen Explosion</i> ◆ <i>umfangreiches Freiwerden giftiger Stoffe</i> ◆ <i>großen Brand</i> führen können. |
| E | Beschränkungen für alle gefährlichen Güter außer UN 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373 ³ |

Diese Kategorisierung lässt folgende Reihenfolge in der Bewertung erkennen:

- | | |
|------------------------|---------------------------------------|
| ◆ geringere Gefährdung | Brand von Stoffen ohne Deklaration |
| ◆ mittlere Gefährdung | großer Brand brennbarer Flüssigkeiten |
| ◆ höhere Gefährdung | große Freisetzungen toxischer Stoffe |
| ◆ höchste Gefährdung | große und sehr große Explosionen |

Es ist äußerst schwierig, eine Vorstellung über die tatsächliche Häufigkeit dieser möglichen Szenarien in der Praxis zu bekommen. Dies liegt einerseits daran, dass besonders spektakuläre Ereignisse allbekannt und von vielen Seiten publiziert werden, andererseits aber nur sehr wenige Informationen über alle übrigen weniger spektakulären Ereignisse verfügbar sind. Im Elbtunnel Hamburg passieren jährlich etwa 10 Brände und etwa 170 Verkehrsunfälle jeglicher Art [Karagounis et al. 2007]. Die tägliche Fahrzeugbelastung liegt bei durchschnittlich 110 000 Kfz mit einer Spitzenbelastung von 140 000 Fahrzeugen pro Tag. Der Anteil an Lkw in diesem Fahrzeugaufkommen wurde mit 15 % angegeben. Um die Sicherheit dieser Aussagen zu untermauern wurde die Verkehrsstatistik in Deutschland herangezogen. In der Verkehrsstatistik gibt es allerdings keine Aussagen über Brände oder Gefahrgutunfälle in Tunneln. Vielmehr beziehen sich alle Aussagen auf Unfälle im Straßenverkehr. Betrachtet wurden vor allem Todesfälle und die Anzahl der Schwerverletzten, die noch am ehesten Hinweise zur Korrelation von Einzelinformation geben können. Zunächst wurde für die Jahre 1997 bis 2006 die Anzahl der Schwerverletzten und Todesfälle bei Straßenunfällen ermittelt.

³ UN 2919 Radioaktive Stoffe, unter Sondervereinbarung befördert, nicht spaltbar oder spaltbar, freigestellt
UN 3291 Klinischer Abfall, unspezifiziert, nicht anders genannt
UN 3331 Radioaktive Stoffe, unter Sondervereinbarung befördert, spaltbar
UN 3373 Klinische Proben

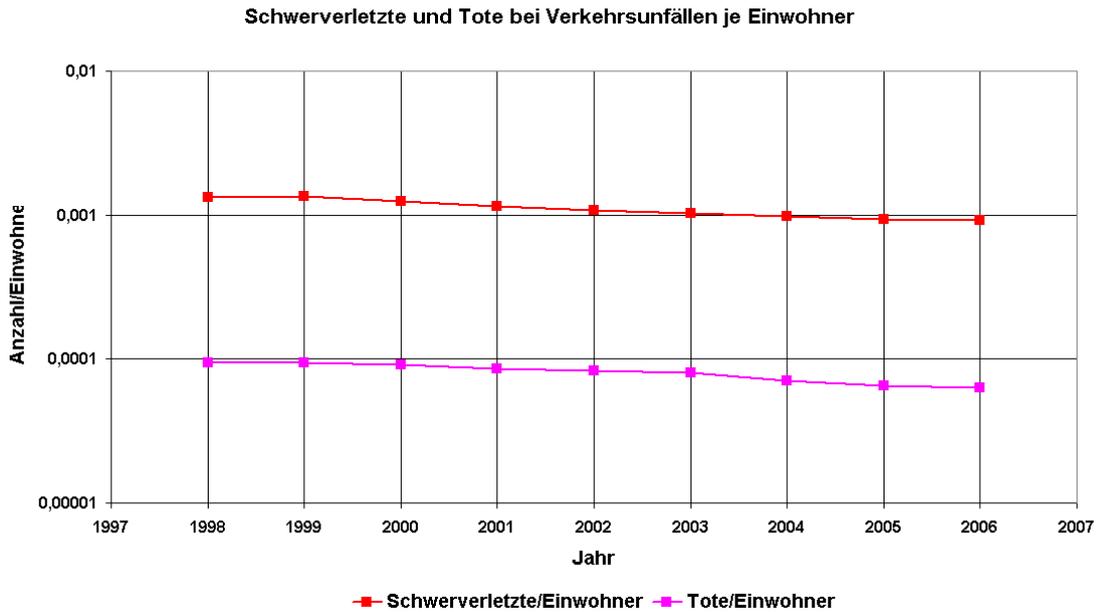


Abbildung 1: Schwerverletzte und Tote bei Verkehrsunfällen in Deutschland

In Deutschland werden somit bei Verkehrsunfällen etwa 100 auf 10^6 Einwohner getötet, die Anzahl der Schwerverletzten liegt etwa um eine Zehnerpotenz höher. Betrachtet man die Anzahl der Schwerverletzten bei Verkehrsunfällen bezogen auf die Fahrzeugart, so ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 2).

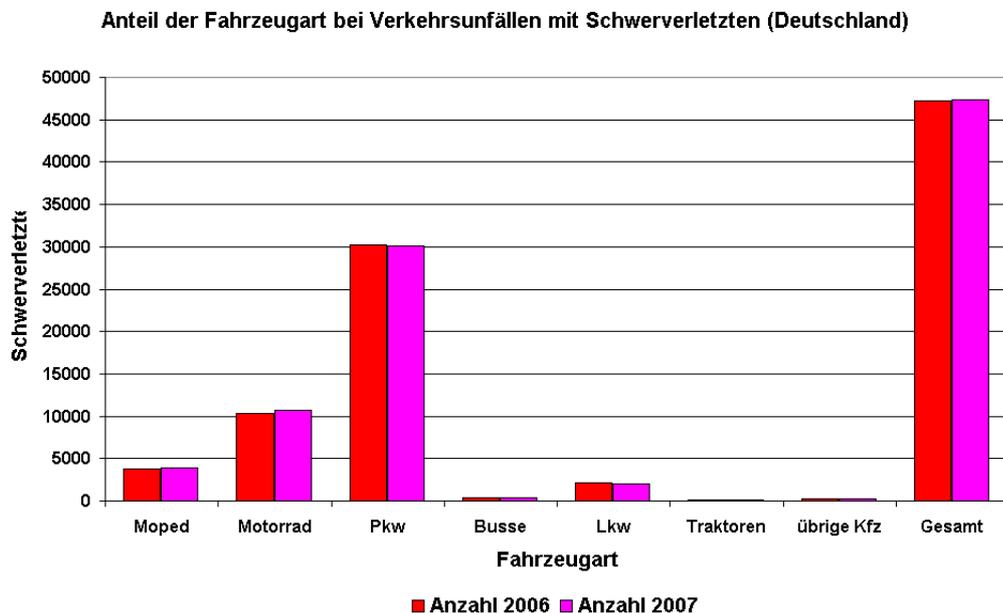


Abbildung 2: Anteil der Fahrzeugart an Verkehrsunfällen

Die Anzahl der erfassten Verkehrsunfälle betrug im Jahr 2007 in Deutschland 2 103 820. Aus der Statistik von [Destatis 2008] geht hervor, dass die Mehrzahl aller Unfälle in Deutschland durch Zweiradfahrzeuge und Pkw hervorgerufen werden. Bei Unfällen mit Schwerverletzten lag die prozentuale Anzahl für Zweiradfahrzeuge und Pkw bei 94 % und nur 4 % entfielen auf Lkw. Bei den tödlichen Unfällen erreichten Zweiradfahrzeuge und Pkw noch 90 % während der Anteil der Lkw auf 8,5 % anstieg.

Im Jahr 2007 waren in Deutschland 55 511 374 Fahrzeuge zugelassen. Bezogen auf diese Anzahl macht die Zahl der erfassten Verkehrsunfälle einen prozentualen Anteil von 3,8 % aus. Für die schweren Verkehrsunfälle mit Schwerverletzten wird für 2007 eine Zahl von 76200 Unfällen registriert, die auf die Zahl der zugelassenen Fahrzeuge bezogen einem prozentualen Anteil von 0,14 % entspricht. Damit wird deutlich, dass die Anzahl der Unfallereignisse mit großem Personenschaden, bezogen auf die Gesamtzahl der zugelassenen Fahrzeuge, gering ist. Da leider keine Aussage zu Bränden in Tunneln vorliegt, als diejenige zum Hamburger Elbtunnel, ist es schwierig auf die möglichen Brandereignisse zu schließen. Es dürfte aber anzunehmen sein, dass sie gegenüber den Unfallereignissen um mindestens zwei bis drei Zehnerpotenzen niedriger liegen werden.

Um entsprechende Wahrscheinlichkeiten für die Ereignisse in Tunneln zu erhalten, wurden die verschiedenen Risikoanalysen untersucht. [Knoflacher et al. 2002] beschreibt in seiner Risikoanalyse zum Tauerntunnel neu aufgestellte Werte für die Wahrscheinlichkeit des Eintritts von Ereignissen mit Todesfolge für verschiedene Szenarien (Tabelle 7). Die neuen Werte beziehen sich auf eine veränderte Ventilation (Neu1) und auf die zusätzliche Regelung, dass die HGV in einem Abstand von 50 m (Neu 2) bzw. 100 m (Neu 3) vor dem vorausfahrenden Fahrzeug zum Halten kommen.

Tabelle 7: Neufestlegung der Wahrscheinlichkeitswerte für den Tauerntunnel
[Knoflacher et al. 2002]

| Szenario | Wahrscheinlichkeitswerte Todesopfer/Jahr | | | |
|-------------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | alt | Neu 1 | Neu 2 | Neu 3 |
| Alle Szenarien | $1.428 \cdot 10^{-2}$ | $9.807 \cdot 10^{-3}$ | $5.901 \cdot 10^{-3}$ | $4.177 \cdot 10^{-3}$ |
| Brennbare Flüssigkeiten | $1.046 \cdot 10^{-2}$ | $7.688 \cdot 10^{-3}$ | $4.146 \cdot 10^{-3}$ | $2.766 \cdot 10^{-3}$ |
| 20 -100 MW Brände | $3.143 \cdot 10^{-3}$ | $1.853 \cdot 10^{-3}$ | $1.501 \cdot 10^{-3}$ | $1.175 \cdot 10^{-3}$ |
| Toxische Produkte | $5.008 \cdot 10^{-4}$ | $9.367 \cdot 10^{-5}$ | $8.691 \cdot 10^{-5}$ | $7.335 \cdot 10^{-5}$ |
| Propan im Tank | $1.764 \cdot 10^{-4}$ | $1.728 \cdot 10^{-4}$ | $1.677 \cdot 10^{-4}$ | $1.627 \cdot 10^{-4}$ |

Die [OECD 2001] beschreibt für die in Tabelle 8 aufgeführten Gefahrgutszenarien die Ereigniswahrscheinlichkeit.

Tabelle 8: Ereigniswahrscheinlichkeit nach [OECD 2001]

| Szenario | Charakteristik der Szenarien | | | Ereigniswahrscheinlichkeit | | | |
|---------------------------|------------------------------|----------------------|--------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Szenario | Gefahrgut- klasse | Ladung | innerorts | außerorts | Tunnel innerorts | Tunnel außerorts |
| BLEVE Propangasflasche | 3 | 2 | klein | $4,3 \cdot 10^{-4}$ | $8,0 \cdot 10^{-4}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $5,1 \cdot 10^{-3}$ |
| Poolbrand Benzin | 4 | 3 | groß | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | $4,5 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-2}$ |
| VCE Benzin | 5 | 3 | groß | $2,7 \cdot 10^{-4}$ | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,8 \cdot 10^{-4}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |
| Chlorfreisetzung | 6 | 1 | groß | $3,1 \cdot 10^{-2}$ | $5,4 \cdot 10^{-2}$ | $3,1 \cdot 10^{-2}$ | $5,4 \cdot 10^{-2}$ |
| BLEVE Propantank | 7 | 2 | groß | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $4,2 \cdot 10^{-4}$ | $2,8 \cdot 10^{-4}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |
| VCE Propantank | 8 | 2 | groß | $2,3 \cdot 10^{-4}$ | $4,2 \cdot 10^{-4}$ | $2,8 \cdot 10^{-4}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ |
| Freistrahle Propangastank | 9 | 2 | groß | $2,3 \cdot 10^{-3}$ | $4,2 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^{-3}$ | $2,0 \cdot 10^{-2}$ |
| Ammoniakfreisetzung | 10 | 1 | groß | $3,1 \cdot 10^{-2}$ | $5,4 \cdot 10^{-2}$ | $3,1 \cdot 10^{-2}$ | $5,4 \cdot 10^{-2}$ |

[Pöttsch 2004] hat die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung von Chlor aus Binnentankschiffen auf dem Rhein untersucht. Er errechnete als Eintrittswahrscheinlichkeit einer Freisetzung $6 \cdot 10^{-2}$ Unfälle pro Jahr. Unter Berücksichtigung der Transportleistung der Schiffe ergibt sich eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $8 \cdot 10^{-6}$ Unfälle pro Transportkilometer.

Es wird deutlich, dass Bewertungen der Risiken mit unterschiedlich basierten Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt werden können. Als wesentlich ist aber zu konstatieren, dass für die Bewertung der Risiken unterschiedlichster Art und Zielrichtung für Tunnel definierte Gefahrenszenarien aufgestellt wurden, denen inhaltlich im Wesentlichen gleiche Stoffe und vergleichbare Reaktionsabläufe zugrunde liegen. Das deutsche technische Sicherheitsrecht einschließlich des Umwelt- und Arbeitsschutzrechts und auch des Störfallrechts verwendet als Eingriffsgrundlage bzw. -voraussetzung vornehmlich den Begriff der Gefahr mit zahlreichen Synonymen [Wietfeldt 2002]. Der Begriff der Gefahr ist ein, seit über zweihundert Jahren im Polizeirecht geprägter Rechtsbegriff. Es war und ist die Aufgabe der Polizei bei einer bevorstehenden Gefahr die nötigen Anstrengungen zur Erhaltung von Ruhe, Ordnung und Sicherheit einzuleiten und zu gewähren. Die Definition des Begriffes Gefahr weist zwei wesentliche Elemente auf

- ◆ den Eintritt eines Schadens für ein Schutzgut der öffentlichen Ordnung und Sicherheit und
- ◆ die hinreichende Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Schadens.

Damit wird deutlich, dass der Begriff Gefahr qualitativ die Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer Gefahr erzeugenden Ereignisses bereits impliziert. Diese Definition bedeutet für die Lösung der hier gestellten Aufgabe, dass für die zur Risikoanalyse zugrunde liegenden Szenarien und möglicherweise auch für Abstufungen innerhalb der Ereignisszenarien die nötigen Maßnahmen für eine Beherrschung der Gefahren analysiert und abgeleitet werden müssen. Zusätzlich müssen die bei der Beseitigung der Ereignisse eintretenden Auswirkungen auf die Einsatzkräfte berücksichtigt werden und sowohl aus physischer als auch psychischer Sicht die notwendigen Grenzwerte bestimmt werden.

3 Ereignisszenarien

3.1 Tunnelbrände

3.1.1 Belüftungsbedingungen in Tunneln

Tunnel stellen zweiseitig geöffnete Röhren dar, die in der Regel eine natürliche Belüftung besitzen oder deren Belüftung durch spezielle Belüftungsanlagen gesteuert wird. Im Normalbetrieb dienen die Belüftungsanlagen zum Austausch der mit Fahrzeugabgasen verunreinigten Luft innerhalb der Röhre. Neben der natürlichen Belüftung und den Belüftungsanlagen wird eine Luftbewegung im Tunnel auch durch die Kolbenwirkung der sich bewegenden Fahrzeuge erzeugt. Um im Ereignisfall kurzfristig reagieren zu können, soll im Regelbetrieb die Längslüftung im Tunnel eine Mindestgeschwindigkeit von 1 m/s und die Halbquer- und Querlüftung mindestens vier Luftwechsel pro Stunde gewährleisten [RABT 2006]. Allerdings sind in Tunneln im Regelbetrieb oft höhere Strömungsgeschwindigkeiten von 7 - 8 m/s zu verzeichnen. Im Brandfall sollten gemäß RABT Geschwindigkeiten entsprechend Absatz 4.3.4 der Richtlinie von 1,5 m/s bzw. 2,3 - 3,6 m/s eingestellt werden.

Mit der Luftströmung wird ständig Luftsauerstoff durch die Tunnelröhre geleitet, der im Brandfall für die Verbrennungsreaktion zur Verfügung steht. Natürlich ist klar, dass mit zunehmendem Tunnelquerschnitt bei Einhaltung der festgelegten Strömungsgeschwindigkeit an jeder Stelle des Tunnels durch die Querschnittsfläche ein definierter Massenstrom an Sauerstoff zur Verfügung steht, welcher im Brandfall die Freisetzung von Energie bestimmt. Berechnet man also aus dem an einer beliebigen Querschnittsfläche des Tunnels zur Verfügung stehenden Massenstrom an Luftsauerstoff, dann ist es möglich, die maximal mögliche Brandleistung (HRR) zu bestimmen. Es ist hier nur die von [Thornton 1917] fixierte und später oft bestätigte Energie von 13,1 MJ, die beim Verbrennen von organischen Stoffen unter Verbrauch von 1 kg Sauerstoff freigesetzt wird, zu verwenden. Legt man zunächst eine vollständige Verbrennung des verfügbaren Luftsauerstoffs zugrunde, so erkennt man, dass offensichtlich in Tunnelanlagen, selbst bei normaler, den bestimmungsgemäßen Zustand der Tunnelluft garantierender Belüftung, genügend Sauerstoff an jedem Ort zur Verfügung steht. Die bisher in Tunneln ermittelten HRR's zeigen,

dass die Verbrennung nur in den seltensten Fällen unterventiliert war, weil die eingesetzte Brandlast zu gering war.

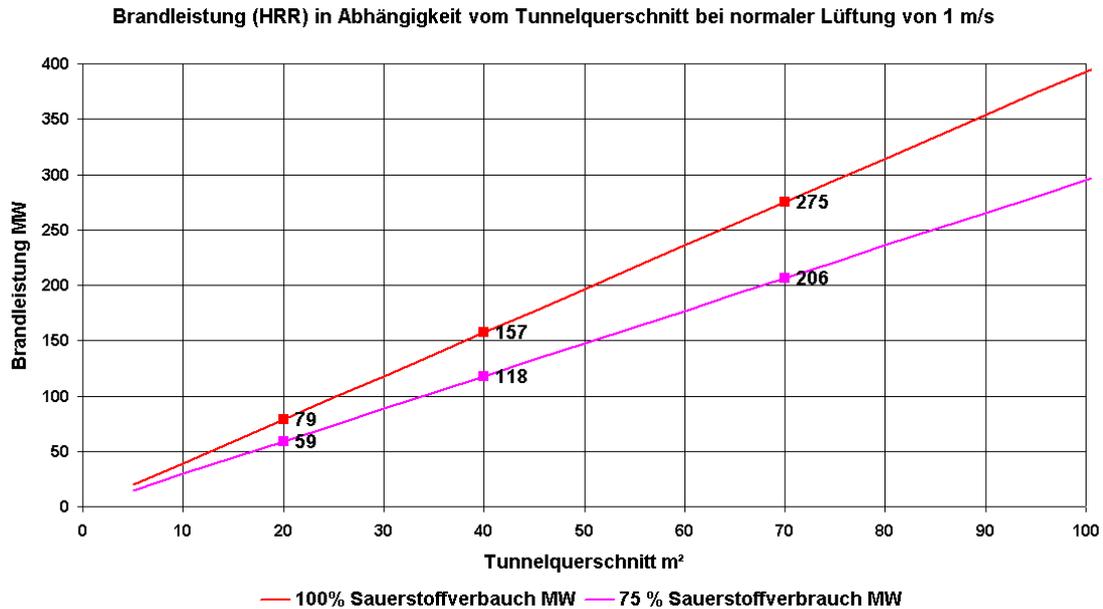


Abbildung 3: Mögliche Brandleistung in Tunneln mit bestimmungsgemäßer Belüftung

Aus Abbildung 3 ist ersichtlich, dass bei vollständiger Verbrennung des Sauerstoffs, der bei einer Belüftung mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s eine Querschnittsfläche des Tunnels von 50 m² durchtritt, bereits eine Brandleistung von 200 MW erreicht wird. Geht man davon aus, dass nur 75 % des in der Querschnittsfläche verfügbaren Sauerstoffs bei einem Brand umgesetzt werden, tritt die Brandleistung von 200 MW bei einer Querschnittsflächen von 68 m² auf.

Jede zusätzliche Belüftung, wie sie im Brandfall zur Abführung der Rauchgase und zur Verhinderung von Rauchgasströmungen gegen die vorherrschende Strömungsrichtung (backlayering) eingesetzt wird, bringt zusätzlichen Luftsauerstoff zur Verbrennung mit.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen, dass der verfügbare Luftsauerstoff während der Belüftungsphase im Brandfall eine erhebliche Steigerung der Brandleistungen ermöglichen könnte. Im realen Brandfall wird dagegen die Brandleistung durch die Verteilung des Brandstoffes und durch die Rückstrahlung auf die kondensierte Phase bestimmt. Die Verbrennung wird durch den Brandstoff und die Geschwindigkeit seiner Bereitstellung für die Verbrennungsreaktion bestimmt (Brandstoff-kontrollierte Verbrennungsreaktion).

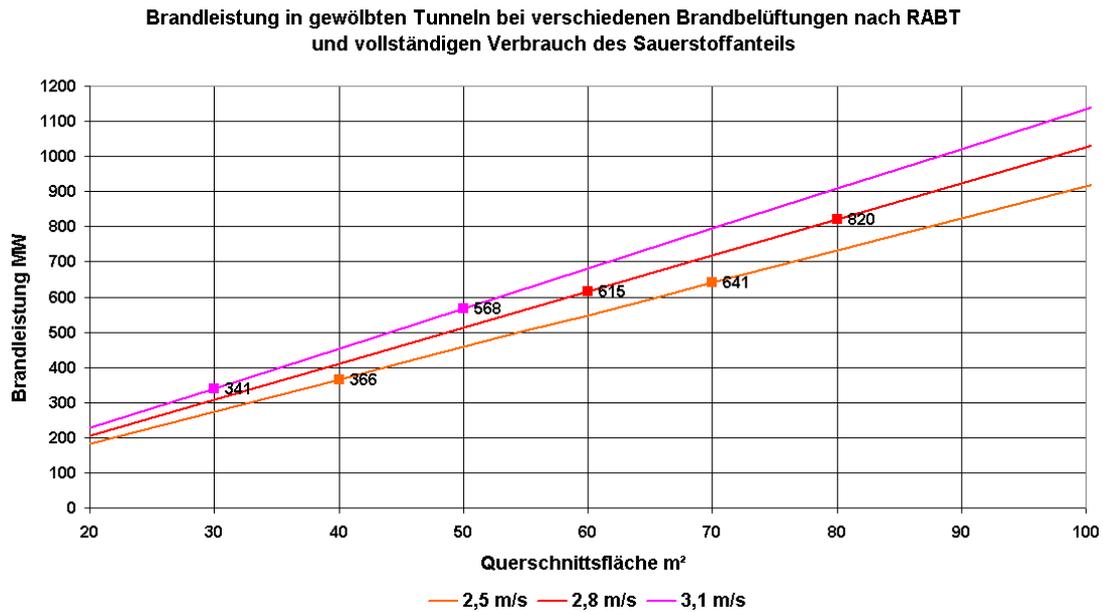


Abbildung 4: Mögliche Brandleistung in gewölbten Tunneln bei Brandbelüftung nach RABT

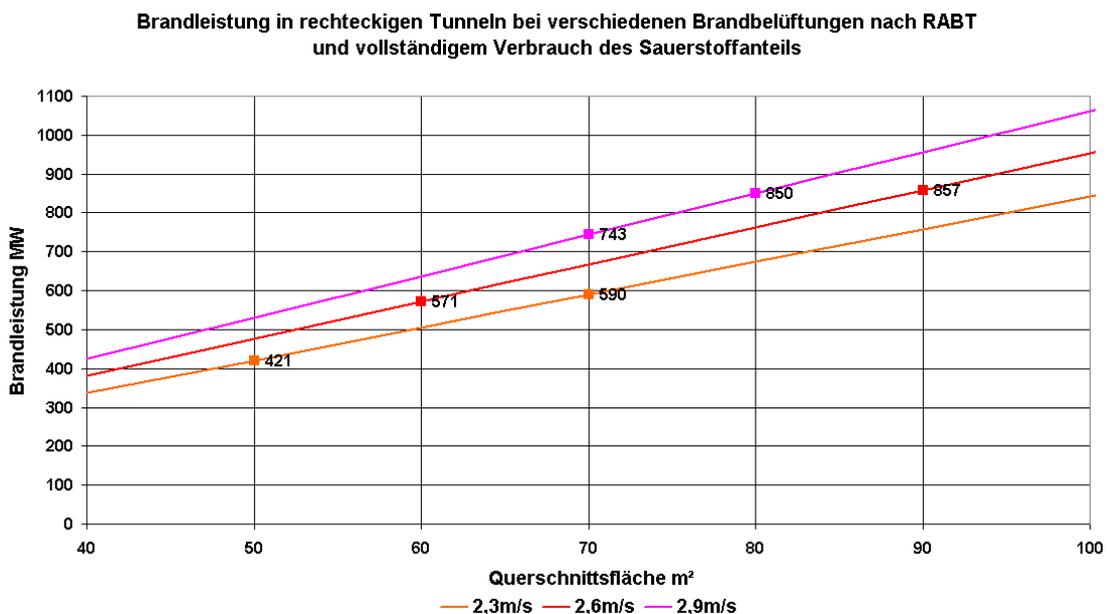


Abbildung 5: Mögliche Brandleistung in rechteckigen Tunneln bei Brandbelüftung nach RABT

Die wesentliche Größe für die Bereitstellung von dampf- bzw gasförmigen brennbaren Stoffen aus der kondensierten Brandstoffphase ist die Fläche der Brandstoffe, die der direkten Rückstrahlung der Flammen ausgesetzt ist. Damit stellen die Brandfläche und bei dreidimensionalen kondensierten Phasen auch die im Volumen enthaltenen Oberflächen des Brandstoffes ein wesentliches Kriterium für die Verbrennung dar.

Da es für eine Vielzahl von Stoffen Messergebnisse zu den flächenabhängigen Massenströmen (Abbrand- und Pyrolyseraten) gibt, können mit deren Hilfe aus den Brandleistungen die Brandflächen ermittelt werden. Eine derartige Zuordnung ist allerdings nur unter der Voraussetzung möglich, dass der Brandstoff entsprechend seiner chemischen Zusammensetzung gleichmäßig verbrennt und über den gesamten Verbrennungszeitraum nahezu konstante Bedingungen herrschen.

Im Einzelnen gelten folgende Zusammenhänge:

- ◆ Sauerstoff-Massenstrom an einer beliebigen Querschnittsfläche im Tunnel

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{81,9 \cdot v_L \cdot A_{Tun}}{T_U} \quad \text{in kg/s} \quad (1)$$

Die Konstante 81,9 wird berechnet aus dem Produkt der Normtemperatur, dem Massenanteil des Sauerstoffes in der Luft, seiner Molmasse kg/mol und dem Normvolumen idealer Gase in m³/mol als Quotienten.

- ◆ Brandleistung für den vollständigen Verbrauch des Sauerstoff-Massenstroms

$$\dot{Q}_{Brd} = HRR = \dot{m}_{O_2} \cdot E_{O_2} \quad \text{in MW} \quad (2)$$

Die Konstante E_{O₂} beträgt 13,1 MJ/kg Sauerstoff.

- ◆ Berechnung des Massenstroms an verbrennendem Stoff

$$\dot{m}_{Brd} = \frac{\dot{Q}_{Brd}}{\Delta H_{H,Brd}} \quad \text{in kg/s} \quad (3)$$

- ◆ Berechnung der Brandfläche bei gegebener Brandleistung

$$A_{Brd} = \frac{\dot{m}_{Brd}}{0,9 \cdot r_{Brd}} \quad \text{in m}^2 \quad (4)$$

Die Konstante von 0,9 resultiert aus der Annahme, dass die gemessene Abbrandrate für freie Brände gültig ist während bei Bränden in Räumen ein Teil der dampf- bzw. gasförmigen Verbindungen nicht vollständig umgesetzt wird.

Nach Gleichung (3) erhält man die Masseströme für verschiedene Brandstoffe. Abbildung 6 gibt die berechneten Werte für Kiefernholz, PE und Benzin wieder.

Aus Abbildung 6 ist erkennbar, dass Stoffe mit hohem Energieinhalt (Heizwert) den verfügbaren Sauerstoff bei geringerem Stoffmassenstrom verbrauchen. Der Massentransport aus der kondensierten Phase in die Verbrennungszone wird nach der Zündung ausschließlich durch die Verbrennung selbst geliefert. Die entscheidende Größe ist die Rückstrahlung von der Flamme auf die Oberflächen der kondensierten Phase. Bei Freibränden wird allgemein angenommen, dass etwa 30 % der Flammenstrahlung innerhalb der kondensierten Phase Prozesse für die Verdampfung und Pyrolyse initiieren, die in der Regel endothermer Natur sind. Es liegt damit auf der Hand, dass flüssige Brennstoffe, die nur einen Phasenübergang für die Verdampfung benötigen, einen geringeren Energieeintrag erfordern.

Bei den leicht flüchtigen brennbaren Flüssigkeiten ist die notwendige Energie zur Verdampfung (Verdampfungsenthalpie) nur gering und die Erwärmung der Flüssigkeitsoberfläche bis zu ihrem Siedepunkt erfordert nur wenig Energie. Schwere Mineralöle dagegen benötigen mehr Energie bis zur Erwärmung auf Siede- oder Zersetzungstemperaturen und sowohl die Verdampfungsenthalpie als auch die Zersetzungs- oder Pyrolyseenthalpie besitzen höhere Werte.

Brandstoffmassstrom bei 75 % Sauerstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Brandleistung
(Lüftungsgeschwindigkeit 1 m/s)

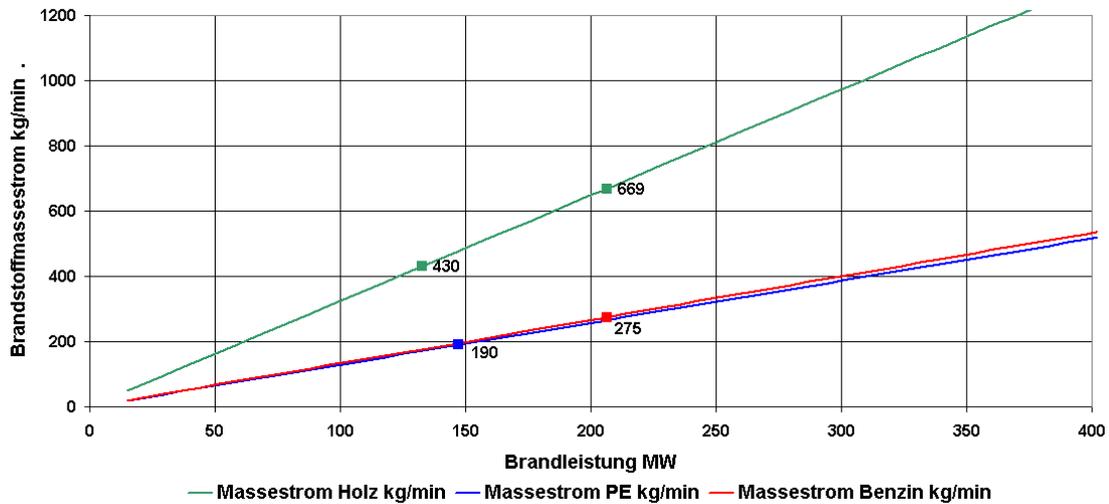


Abbildung 6: Berechnete Masseströme für verschiedene Brandstoffe bei Bränden in Tunneln

Feste Brandstoffe erreichen die Gasphase entweder über einen Schmelzprozess mit anschließendem Aufheizen bis zur Siedetemperatur und nachträglicher Verdampfung oder durch Pyrolyse. Die festen schmelzenden Brandstoffe benötigen in der Mehrzahl weniger Energie bis zum Stoffübergang in die Gasphase. Die Zersetzungs- oder Pyrolysetemperaturen liegen meist höher als die Siedetemperaturen. Je nach Fortschritt der Zersetzung steigt die Energie zur weiteren Zersetzung an, bis die Anteile des ursprünglichen Brandstoffes, welche die Fähigkeit zum Übergang in die Gasphase besitzen, verdampft sind. Dann bleibt entweder ein unbrennbarer Rückstand übrig oder der Rückstand kann an der Phasengrenze direkt mit dem Luftsauerstoff reagieren und es kommt zu einer heterogenen Verbrennung – dem Glutbrand. Glut wird vor allem von stark kohlenstoffhaltigen Verbrennungsrückständen gebildet.

Der Feststoff PE und die Flüssigkeit Benzin besitzen nahezu den gleichen Heizwert, so dass auch der Massenstrom, der zum 75 % - igen Verbrauch des verfügbaren Sauerstoffs erforderlich ist, fast übereinstimmt (Abbildung 6). Trotzdem unterscheiden sich die beiden Stoffe in ihrer kondensierten Phase deutlich voneinander und zusätzlich beide von den Eigenschaften des Kiefernholzes als dritten Brandstoff. Geht man davon aus, dass sich die Rückstrahlung bei Bränden im Freien ab einer bestimmten Brandgröße nicht wesentlich ändert, kann man erwarten, dass für Stoffe mit geringem Heizwert und hoher Pyrolyseenergie der notwendige Massenstrom nur dann erreicht werden kann, wenn die Brandfläche ausreichend groß ist. Der feste Brandstoff mit dem hohen Heizwert und einer ähnlichen Pyrolyseenergie benötigt eine geringere Brandfläche und die kleinste Brandfläche erfordert die brennbare Flüssigkeit.

In diesem Beispiel wurden empirisch bei Freibränden ermittelte Abbrandraten, dies sind flächenbezogene Massenströme, für die Verdeutlichung der Unterschiede im Brennverhalten benutzt. Die angesetzte Verringerung der Abbrandrate um den Faktor 0,9 trägt der Tatsache Rechnung, dass bei Bränden innerhalb von Umhüllungen der durch Pyrolyse entstehende Massenstrom nicht vollständig zu Brandendprodukten umgesetzt werden dürfte. Dies führt unter Nutzung von Gleichung (4) zu Brandflächen, die um 10 % größer sind.

Gleichung (4) wurde zur Berechnung der möglichen Brandflächen im Tunnel verwendet und in Abbildung 7 dargestellt. Die Ergebnisse der berechneten Flächen weisen sehr deutlich auf die Unterschiede im Brandverhalten der ausgewählten brennbaren Stoffe hin.

aus 75 % Sauerstoffverbrauch im Tunnel berechnete Brändflächen für verschiedene Brandstoffe (Luftgeschwindigkeit 1m/s)

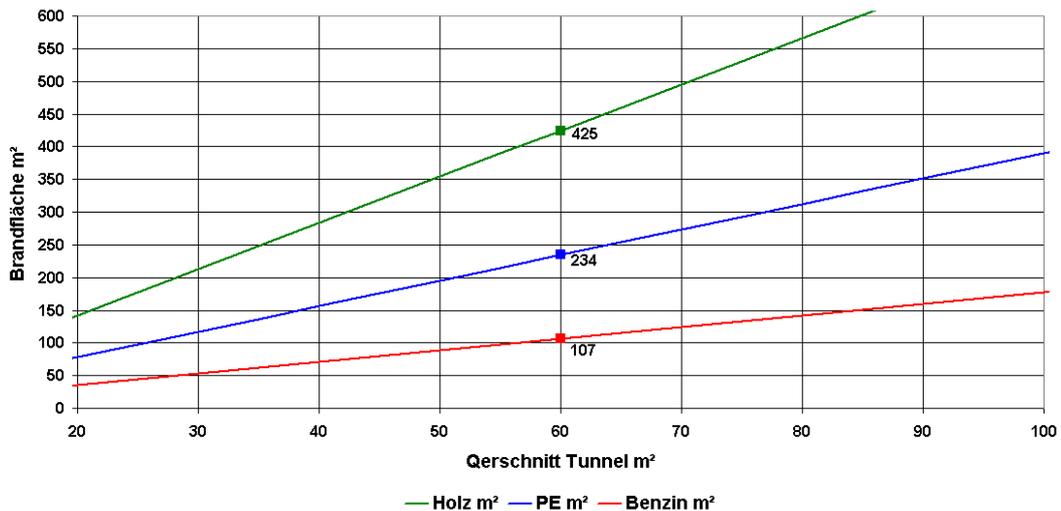


Abbildung 7: Berechnete Brandflächen in Tunneln

Es können auch weitere Aussagen zum Brandverhalten der Stoffe abgeleitet werden. So kann Holz aufgrund der großen Brandflächen, die im Realfall meist nicht auftreten, größere Brandleistungen nur dann erreichen, wenn mehrere Fahrzeuge in den Brandfall verwickelt sind. Feste Brandstoffe mit hohem Energieinhalt dagegen können bereits bei deutlich geringeren Brandflächen hohe Brandleistungen erreichen. Die deutlich höchsten Brandleistungen lassen sich mit leicht flüchtigen (volatilen) flüssigen Brandstoffen erzielen.

Trotz dieser zunächst auf die Gesamtverhältnisse in Tunneln bezogenen Abschätzungen gibt es in der Literatur Hinweise, dass es bei großen Brandleistungen zu Instabilitäten in der Verbrennung kommt. Instabilitäten im Verbrennungsregime weisen darauf hin, dass derartige Brände unterventiliert sein können. In einer Arbeit von [Kim 2006] wurden die Versuche im Runehamar-Tunnel hinsichtlich der Pulsation der Flammen ausgewertet. Die Messungen der HRR zeigten bei allen vier Tests, dass die Peaks der HRR zwischen 100 MW und 220 MW lagen. Bei den Tests 1 und 2 pulsierte der Gasfluss im Tunnel hinter dem Brandherd im Abgasstrom, wenn die HRR 130 MW überstieg. Die Pulsation war periodisch, so dass die Gasgeschwindigkeiten im Minimum mit 1 m/s und im Maximum mit 5 m/s gemessen wurden. Die Amplitude des Pulsierens änderte sich entsprechend den Änderungen der HRR [Kim 2006]. Wenn die HRR zunahm, war das Ausmaß der Pulsation gesteigert.



Abbildung 8: Bilder aus dem Videoclip der Pulsationen im Runehamar-Tunnel nach [Kim 2006]

Die Konzentrationen an Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und Kohlendioxid an einer Messstelle, die sich etwa 460 m hinter dem Brandherd im Abgasstrom befand, zeigten, dass jeder Brand ausreichend ventiliert war. Trotzdem ist die Möglichkeit des Auftretens örtlich unterventilierter Bereiche am Brandherd nicht auszuschließen. Infolge der hohen Temperaturen, auch im Abgasstrom, kann die nachträgliche Oxidation des Kohlenmonoxids durchaus möglich sein. Pulsierende Gasströme dürften somit auch die Gefahr einer nachträglichen Durchzündung in sich bergen, wie dies bei Bränden im Freien immer wieder beobachtet wird.

3.1.2 Brandentwicklung bei Tunnelbränden

Allgemein ist davon auszugehen, dass bei Tunnelbränden in der Anfangsphase des Brandes immer ausreichend Sauerstoff zur Verfügung stehen wird. Die Verbrennungsreaktion wird damit die vorhandenen Brandstoffe in der Gasphase nahezu vollständig umsetzen und ebenso wird die im Brandstoff verfügbare Energie freigesetzt. Das bedeutet, dass im Verbrennungsbereich der Flammen eine maximale Temperatur auftritt. Da zwischen der Bauwerksdecke und dem brennbaren Material relativ geringe Abstände auftreten, erreichen die Flammen im Zentrum des Brandes sehr schnell die Decke des Tunnels. An der Decke wird die Energie an das Bauwerk übertragen bzw. in Strömungsrichtung abgelenkt. Sowohl die Energieübertragung als auch die Ablenkung der heißen Gase führt zur Rückstrahlung auf die brennbaren Stoffe. Es kommt zu einer Beschleunigung der Aufheizung der kondensierten Phase und damit schließlich zu einer schnelleren Brandentwicklung. Das Phänomen der gesteigerten Brandentwicklung bei gut ventilierten Bränden in kleinen Räumen ist seit langem bekannt. Die Brennrate des gasförmigen brennbaren Stoffes spielt in diesem Fall praktisch keine Rolle mehr, weil immer genügend Sauerstoff verfügbar ist. Demgegenüber wird die Pyrolyserate, also der Massenstrom aus der kondensierten Phase in die Verbrennungszone (Gasphase) zum bestimmenden Schritt. Dieser Stoffstrom ist abhängig von der Rückstrahlung der Flammen und der Umgebung auf den brennbaren Stoff. In Räumen wurden bereits seit langem für verschiedene Brandstoffe Temperaturkurven der Brandentwicklung aufgestellt und mit Hilfe dieser Baumaterialien untersucht. Es zeigte sich, dass sowohl der Brandstoff als auch die Umgebungsbedingungen einen deutlichen Einfluss auf den Kurvenverlauf haben können.

Für die Einschätzung der Gefährdungen durch Brände in Tunneln gibt es zahlreiche Methoden, um mathematisch eine Designfeuerkurve darzustellen. Diese schließen verschiedene Arten der Brandausbreitung, z.B. lineare Ausbreitung $f(t)$, quadratische Ausbreitung $f(t^2)$ oder exponentielle Ausbreitung $f(e^{-t})$ ein.

Nach [Ingason 2006] wird

- ◆ in den französischen Empfehlungen zur Ventilation von Tunneln im Brandfall eine lineare Brandausbreitung in der Zeit von t_0 bis t_{max} angenommen, danach eine konstante maximale HRR bis zur Zeit t_D und schließlich ein konstanter Abfall vom Maximalwert auf 0 zur Zeit t_d .
- ◆ für Brände verschiedener Fahrzeugtypen eine zeitabhängige quadratische Wachstumskurve der HRR von t_0 bis t_{max} , ein konstanter Maximalwert bis zur Zeit t_D und schließlich ein exponentieller Abfall der HRR vom Maximum auf 0 nach unendlicher Zeit empfohlen,
- ◆ eine Abschätzung der Wärmefreisetzung möglich, wenn man eine einzige exponentielle Funktion der Zeit vom Beginn der Brandentwicklung bis zum völligen Ausbrennen einführt. Dieser Ansatz gilt nur für brennstoffkontrollierte Brände. Es wird die maximale Energiefreisetzung, die maximal vorhandene Energie und ein beliebig zu wählender Parameter ohne physikalische Bedeutung eingesetzt.

Die nachfolgende Tabelle 9 gibt die von [Ingason 2006] zusammengestellten Designfeuerkurven für Brände in Tunneln allgemein wieder.

Tabelle 9: Designfeuerkurven für Tunnelbrände [Ingason 2006]

| Methode | Energiefreisetzung als f(t) | Zeitintervall | Zeit bis Maximum |
|---|--|----------------------|---|
| Lineare Brandausbreitung nach Lacriox | $HRR = \alpha_{g,L} \cdot t$ | $0 \leq t_{\max}$ | $t_{\max} = \frac{\dot{Q}_{\max}}{\alpha_{g,L}}$ |
| | $HRR = \alpha_{g,L} \cdot t_{\max} = \dot{Q}_{\max}$ | $t_{\max} < t < t_D$ | |
| | $HRR = \dot{Q}_{\max} - \alpha_{D,L}(t - t_D)$ | $T_D < t < t_d$ | |
| Quadratische Brandausbreitung nach Ingason | $HRR = \alpha_{g,q} \cdot t^2$ | $0 \leq t_{\max}$ | $t_{\max} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{\alpha_{g,q}}}$ |
| | $HRR = \alpha_{g,q} \cdot t_{\max}^2 = \dot{Q}_{\max}$ | $t_{\max} < t < t_D$ | |
| | $HRR = \dot{Q}_{\max} \cdot e^{\alpha_{d,q}(t-t_D)}$ | $t \leq t_D$ | |
| Exponentielle Brandausbreitung, brandstoffkontrolliert nach Ingason | $HRR = \dot{Q}_{\max} \cdot n \cdot r \cdot (1 - e^{-kt})^{n-1} \cdot e^{-kt}$ | $t \leq 0$ | $t_{\max} = \frac{\ln(n)}{k}$ |
| Exponentielle Brandausbreitung, ventilationskontrolliert nach Ingason | $HRR = \dot{Q}_{\max} \cdot \left(18,96 \cdot e^{-\frac{10t}{t_d}} \left(1 - e^{-\frac{10t}{t_d}} \right)^7 + 37,59 \cdot e^{-\frac{7t}{t_d}} \left(e^{-\frac{7t}{t_d}} \right)^{20} \right)$ | $t \geq 0$ | $t_{\max} = 0,24 \cdot t_d$ |

Designfeuerkurven werden heute für nahezu alle Gebäude und Einrichtungen zugrundegelegt. Dazu werden verschiedene Brandausbreitungsgeschwindigkeiten festgelegt. Nach [Benichou 2005] werden vorzugsweise vier Gruppen von Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für die Ableitung der Brandschutzmaßnahmen verwendet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Brandausbreitungsfaktoren für quadratisch abhängige Designfeuer [Benichou 2005]

| Brandausbreitung | α (kW/s ²) | Zeit für das Erreichen von 1 MW s |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| langsam | 0,0029 | 600 |
| mittel | 0,012 | 300 |
| schnell | 0,047 | 150 |
| sehr schnell | 0,188 | 75 |

[Natori et al. 2006] leiteten aus publizierten Ergebnissen von Branduntersuchungen mit Möbeln charakteristische Werte für die Brandausbreitung in Räumen ab. In Tabelle 11 sind die Parameter für Brände von Kunststoffstühlen mit Polyurethan-Polstern aufgeführt.

Tabelle 11: Parameter für repräsentative HRR-Kurven bei Bränden von Kunststoffstühlen mit Polyurethan-Polstern [Natori et al. 2006]

| Parameter | Symbol | Mittelwert | Standard-abweichung | Variations-koeffizient | Erwartung pessimistisch | Erwartung optimistisch |
|--------------------------|------------------------------|------------|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Brandausbreitungs-faktor | α kW/s ² | 0,035 | 0,028 | 0,8 | 0,063 | 0,073 |
| Ausbrennfaktor | α_D kW/s ² | 0,0063 | 0,0049 | 0,78 | 0,0014 | 0,011 |
| Peak HRR | Q_{max} kW | 383 | 186 | 0,49 | 569 | 197 |
| Branddauer Vollbrand | t_{max} s | 118 | 94 | 0,8 | 212 | 24 |

In ähnlicher Weise wurden auch von [Haack 2001] Aussagen zur Brandausbreitung in Tunneln getroffen. Als Grundlage wurden die Runehammar-Tests (Tabelle 12) sowie die französische lineare Designfeuer-Entwicklung nach [Lacroix 1997] (Tabelle 13) genommen.

Tabelle 12: Peak der HRR und Brandausbreitung bei den Runehammar-Versuchen [Haack 2001]

| Test | Zeit bis zum Peak der HRR s | lineare Brandausbreitung kW/s | Peak HRR MW |
|------|-----------------------------|-------------------------------|-------------|
| 1 | 1110 | 341,7 | 203 |
| 2 | 858 | 483,3 | 158 |
| 3 | 624 | 283,3 | 124,9 |
| 4 | 462 | 295 | 70,5 |

Tabelle 13 : Französische Designfeuerdaten [Haack 2001]

| Parameter | Tunnelzwischenraum | | | |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| | < 2,7 m | 2,7 m bis 3,5 m | >3,5 m keine Gefahrgüter | > 3,5 m Gefahrgüter |
| typisches Szenario | 2-3 Pkw | 1 Van | 1 HGV | 1 Benzintanker |
| HRR MW | 8 | 15 | 30 | 200 |
| Brandausbreitungszeit linear min | 5 | 5 | 10 | 10 |
| Peakdauer (t_{max}) min | 20 | 30 | 60 | 60 |
| Ausbrennzeit min | 20 | 20 | 30 | 30 |
| freigegebene Energie GJ | 15 | 40 | 150 | 1000 |
| Rauchflussrate m ³ /s | 30 | 50 | 80 | 300 |

Aus diesen Daten wird bereits deutlich, dass die Brandentwicklung bei Tunnelbränden sehr schnell hohe Verbrennungstemperaturen in der Gasphase zur Folge hat. Dies führte schließlich zur Ableitung verschiedener Tunnelbrandkurven, die häufig im Zusammenhang mit anderen Normbrandkurven dargestellt werden.

Nach [Haack 2001] werden vorrangig die in Abbildung 9 dargestellten Designbrandkurven für die Beurteilung von Brandschutzmaßnahmen bei Bränden in Tunneln herangezogen.

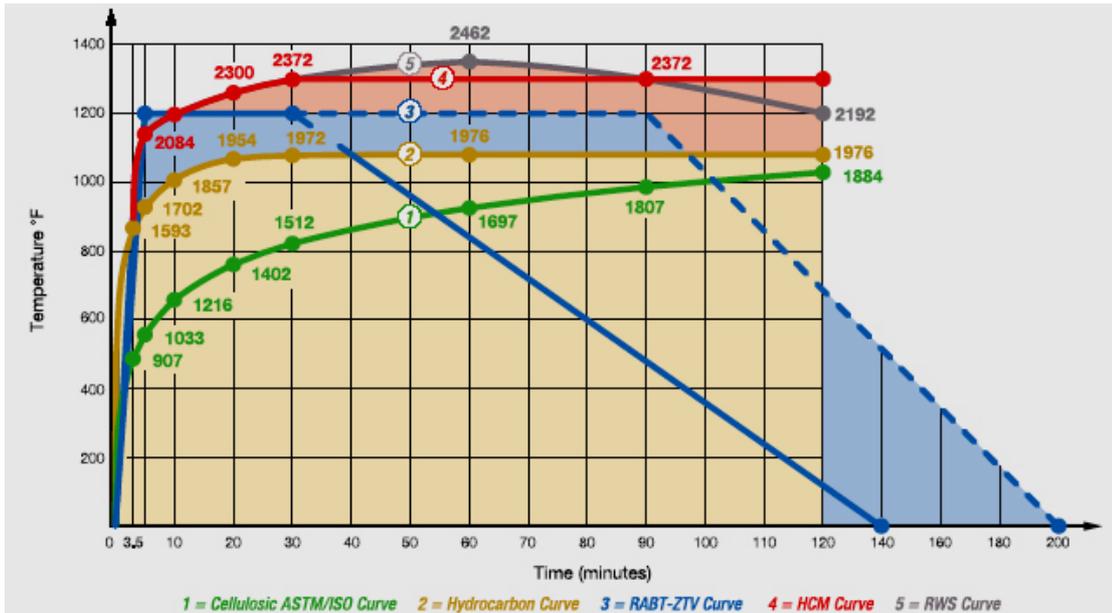


Abbildung 9: Designbrandkurven [Promat 2008]

Allen Kurven (mit Ausnahme der ASTM/ISO-Kurve) ist gemeinsam, dass die Temperatur von 1000 °C bereits während der ersten 10 Minuten der Brandentwicklung erreicht wird. Es ist somit bei der Mehrzahl der Brandfälle eine sehr schnelle Brandentwicklung zu erwarten, die bereits in einer Zeitspanne von 5 bis 10 Minuten die Vollbrandphase erreicht.

[Ingason 2006] ordnete den unterschiedlichen Designkurven Beispiele von Brandszenarien zu, weil die dabei erreichten Temperaturwerte den jeweiligen Designkurven besser entsprechen (Tabelle 14). Zusätzlich wird damit auch deutlich, dass der Temperaturanstieg bei kleinen Fahrzeugen anders abläuft als bei großen Brandstoffmassen.

Tabelle 14: Beispiele für Brandszenarien und ihre Zuordnung zu verschiedenen Brandentwicklungskurven [Ingason 2006]

| HRR MW | | Beispiel für Straßenfahrzeuge | Beispiel für Schienenfahrzeuge | Beispiel für U-Bahnfahrzeuge | Grenzwerte nach Temperaturkurven |
|----------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| LEBENSRISSIKOBAUWERK | 5 | 1-2 Pkw | E-Lok | Waggon (gering brennbar) | ISO 834 |
| | 10 | 2-3 Pkw, 1 Van | | Waggon (normal brennbar) | ISO 834 |
| | 20 | Großer Van, Nahverkehrsbus, Mehrzweck-Lkw | | 2 Waggons | ISO 834 |
| | 30 | Bus, leeres HGK | Personenwaggon | mehr als 2 Waggons | ISO 834 |
| | 50 | Brennbare Ladung von Lkw | Offener Waggon (Schüttgut) | | ISO 834 |
| | 70 | HGV (ca. 4 t) | | | HC |
| | 100 | HGV durchschnittlich | | | HC |
| | 150 | HGV, leicht brennbare Ladung (10 t) | | | RWS |
| >200 | Tankfahrzeuge, mehrere HGK, z.T. unterventiliert | z.T. unterventiliert | | RWS | |

3.1.3 Brandübertragung

Bisher wurde ausschließlich die Brandentwicklung über den vorhandenen Bereich des brennbaren Stoffes betrachtet. Das entspricht der Brandausbreitung über die Oberfläche einer Lkw-Ladung oder die Brandausbreitung über freigesetzte Brandstoffe bei einem Unfall. Die Brandübertragung von einem Ausgangsbrand eines Fahrzeuges auf weitere Fahrzeuge stellt einen weiteren Schritt der Brandentwicklung in Tunneln dar.

[Lönnermark und Ingason 2006] haben in ihren Versuchen im Runehamar-Tunnel auch die Brandübertragung auf Objekte, die sich in Strömungsrichtung der Rauchgase befinden, untersucht. Zu diesem Zweck wurden in dieser Richtung in Abständen, jeweils gerechnet vom Zentrum des Brandes aus, unterschiedliche Proben aufgestellt. In Abbildung 10 wird die Versuchsanordnung verdeutlicht. Da bei den einzelnen Versuchen die Abmessungen des Brandobjektes variierten, waren die Abstände der weiteren eingebrachten Brandstoffe unterschiedlich und es wurden nicht bei allen Versuchen alle Stationen bestückt. Das Ergebnis dieser Experimente wird in Tabelle 15 wiedergegeben. Die Untersuchungen zeigten, dass die Flamme bzw. die Konvektionssäule des Brandes ausreichend Energie mitführt, um auch in größeren Entfernungen Brandstoffe pyrolytisch aufzubereiten, zu verkohlen oder zu verformen. Eine Zündung im Bereich bis etwa 50 m vom Zentrum scheint im Bereich des Möglichen zu liegen.

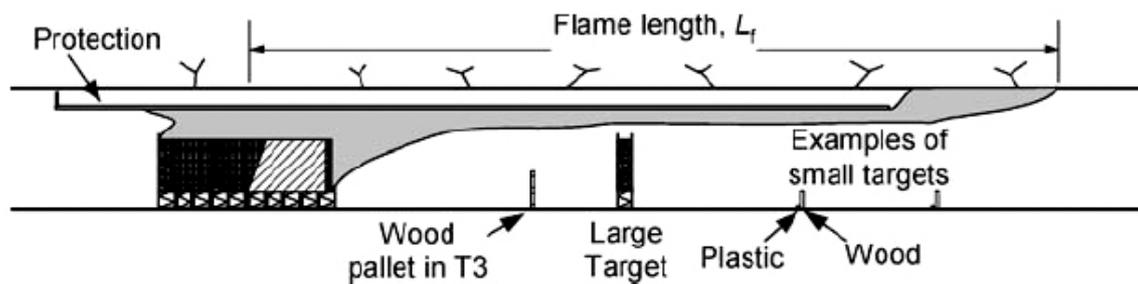


Abbildung 10: Versuchsanordnung zur Brandübertragung (Runehamar-Tunnel)
[Lönnermark und Ingason 2006]

Tabelle 15: Beeinflussung der Brandausbreitung durch Rauchgaskonvektion im Runehamar-Tunnel [Lönnermark und Ingason 2006]

| Distanz vom Zentrum des Brandes m | Versuch T1 | | Versuch T2 | | Versuch T3 | | Versuch T4 | |
|--------------------------------------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|--|
| | Plastik | Holz | Plastik | Holz | Plastik | Holz | Plastik | |
| 20 | | | | | | +++ | + | |
| 25 | | | | | | +++ | + | |
| 27 | | | | | | + | + | |
| 35 | | + | + | | | | | |
| 42 | | | | + | + | * | + | |
| 50 | | + | + | | | | | |
| 52 | | | | +++ | + | | | |
| 53,5 | + | | | | | | | |
| 57 | | | | | | * | + | |
| 62 | | | | +++ | | | | |
| 67 | | | | | | * | □ | |
| 70 | | ++ | + | | | | | |

+ nicht mehr vorhanden ++ verrußt +++ verkohlt * unbeschädigt □ verformt

[Carvel et al. 2005] verweisen darauf, dass bei einer großen Anzahl realer Tunnelbrände mehrere Fahrzeuge am Brandgeschehen beteiligt waren. Von den Autoren wurden die sich im Zeitraum von 1978 bis 2004 ereignenden Brände, an denen mehrere Fahrzeuge beteiligt waren und bei denen Todesopfer zu beklagen waren, aufgelistet. Das Ergebnis ist in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Fahrzeugbrände in Straßentunneln mit tödlichem Ausgang [Carvel et al. 2005]

| Tunnel | Jahr | Tote | Fahrzeuge bei Brandbeginn | HGV | Fahrzeuge, zerstört |
|---------------------------------|------|-------|---------------------------|-----|---------------------|
| Velsen, Niederlande | 1978 | 5 | HGV und Pkw, Unfall | ja | 6 |
| Nihonzaka, Japan | 1979 | 7 | 4 HGV und 2 Pkw, Unfall | ja | 189 |
| Kajiwara, Japan | 1980 | 1 | HGV, Getriebebrand | ja | 2 |
| Sakai, Japan | 1980 | 5 | HGV, Unfall | ja | 10 |
| Caldecott, USA | 1982 | 7 | Pkw, Tanker, Bus, Unfall | | 3 |
| Salang, Afghanistan | 1982 | viele | verschiedene Lkw | | unbekannt |
| Pecorile, Italien | 1983 | 9 | HGV, Unfall | ja | unbekannt |
| L'Arme, Frankreich | 1986 | 3 | Pkw, Unfall | | 1 |
| Gumefens, Switzerland | 1987 | 2 | Pkw, Unfall | ja | 8 |
| Serra a Ripoli, Italien | 1993 | 4 | Pkw, Unfall | ja | 16 |
| Hugenot, South Africa | 1994 | 1 | Bus, Getriebebrand | | 1 |
| Pfänder, Österreich | 1995 | 3 | Pkw, HGV, Bus, Unfall | ja | 3 |
| Isola delle Femmine, Italien | 1996 | 5 | Bus, Pkws, Tanker, Unfall | | 22 |
| Mont Blanc, Frankreich, Italien | 1999 | 39 | HGV, Motorbrand | ja | 34 |
| Tauern, Österreich | 1999 | 12 | HGV, Pkws, Unfall | ja | 40 |
| Gleinalm, Österreich | 2001 | 5 | 2 Pkw, Unfall | | 2 |
| St. Gotthard, Österreich | 2001 | 11 | 2 HGV, Unfall | ja | 23 |
| Fløyfjell, Norway | 2003 | 1 | Pkw, Unfall | | 1 |
| Baregg, Schweiz | 2004 | 1 | 2 HGV, 1 Pkw, Unfall | ja | 3 |

Aus dieser Zusammenfassung ist deutlich sichtbar, dass bei vollentwickelten Bränden in der Mehrzahl mit einer Brandübertragung auf andere im Rauchgasstrom befindliche Fahrzeuge zu rechnen ist.

Ausgehend von einer Auswertung zum Brand eines Auto-Zuges im Kanaltunnel zwischen Frankreich und UK (1996) wurden die Möglichkeiten der Brandübertragung von [Liew et al.] und [Rew und Deaves] in den folgenden, von [Carvel et al. 2005] leicht korrigierten Ursachen gesehen:

- ◆ Flammenauswirkung
- ◆ Flammenausbreitung über längere Strecken
- ◆ Spontane Zündung (in Analogie zum Flashover bei Raumbränden)
- ◆ Brandstoffübertragung einschließlich des Fließens brennbarer Flüssigkeiten und durch Funkenflug
- ◆ Explosion

Mit Hilfe verschiedener Varianten des Modells FIRE-SPRINT wurden von [Carvel et al. 2005] Flammenauswirkungen und spontane Zündungen untersucht und festgestellt, dass mit zunehmender Längslüftungsgeschwindigkeit steigende Brandleistungen für eine Zündung erforderlich sind. Durch Auswertungen von Tests, die im Memorial Tunnel in der Nähe von Charleston, West Virginia, durchgeführt wurden, konnten die bei Tunnelbränden auftretenden Flammenlängen abgeleitet werden. Als Kriterium wurde eine Gastemperatur von 600°C in etwa 4 m Höhe zugrunde gelegt. Mit einer Serie verschiedener Tests mit unterschiedlichen Brandleistungen wurden die Flammenlängen bestimmt und danach die Wahrscheinlichkeiten der

Zündung von Brandstoffen in Tunneln ermittelt. Mit dieser Methode wurde festgestellt, dass Brände mit Brandleistungen > 128 MW in allen Tunneln Flammen produzieren, die bis zu 20 m entfernt stehende LKW's zünden können. Ebenso sind auch Brände mit Brandleistungen zwischen 64 und 128 MW in der Lage, Brandstoffe zu zünden, wobei allerdings bei zweispurigen Tunneln eine Beflammung weniger wahrscheinlich wird, wenn die Entfernung mehr als 10 m beträgt. Bei Bränden mit Brandleistungen zwischen 32 und 64 MW gibt es beträchtliche Unterschiede in den Tunneln hinsichtlich der Wirkungen der Flammen, wobei auch hier bei zweispurigen Tunneln die Wahrscheinlichkeit einer Zündung gering ist, wenn die Entfernung mehr als 10 m beträgt. Im einspurigen Tunnel ist die Wahrscheinlichkeit der Beflammung von Brandstoffen ziemlich hoch, besonders bei höheren Belüftungsgeschwindigkeiten. Für Brände im Bereich von 16 bis 32 MW gibt es eine geringe Wahrscheinlichkeit der Beflammung, ausgenommen bei kleinen Fahrzeugabständen oder im Falle eines einspurigen Tunnels bei hohen Belüftungsgeschwindigkeiten. Die Brandübertragung zu weiteren Fahrzeugen nach einem Unfall kann damit oberhalb bestimmter Brandleistungen nicht ausgeschlossen werden.

3.1.4 Auswirkung unterschiedlicher Belüftungsmethoden

Die Belüftung eines Tunnels ist eine wichtige aktive Methode zur Einflussnahme auf die Auswirkungen eines Gefahrenereignisses, das sich auf das gesamte Bauwerk erstreckt. Wie bereits im Kapitel 3.1.1 ausgeführt, wird bei einem Brandereignis die Belüftung immer dazu führen, dass die Verbrennung im Tunnel durch die kondensierte Phase des Brandstoffes bestimmt wird und somit brennstoffgesteuert abläuft. Das bedeutet, dass sich innerhalb der Verbrennungszonen optimale Verbrennungsbedingungen einstellen und die Temperaturen der Flammenbereiche während der Vollbrandphase Werte von mehr als 1000 °C erreichen. Infolge der nahezu vollständigen Verbrennung bleibt die Toxizität der Rauchgase gering. Insbesondere die Bildung von Kohlenmonoxid wird vergleichbar mit der Kohlenmonoxidbildung bei Bränden im Freien bleiben. Grundsätzliche Zielstellung der Belüftungsmaßnahmen ist es

- ◆ eine gerichtete Strömung im Tunnel zu erzeugen, die vor dem Brandherd eine rauchfreie Zone schafft,
- ◆ die entstandenen heißen Rauchgase möglichst schnell aus dem Bauwerk zu entfernen, um Schäden am Bauwerk durch Wärmeübertragung zu verringern
- ◆ die Evakuierung bzw. Selbstrettung von Personen im Tunnel zu unterstützen,
- ◆ die Brandbekämpfung zu unterstützen bzw. zu ermöglichen.

Die einfachste Methode zur Belüftung von Tunneln ist nach [Waninger und Harth 2004] die Längslüftung mittels Strahlventilatoren. Bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit kann durch diese Methode erreicht werden, dass der Tunnelbereich vor dem Brandherd (upstream) rauchfrei gehalten wird. Normalerweise werden die Flamme und die heißen Rauchgase eines Brandes sehr schnell die Tunneldecke erreichen und sich in beiden möglichen Richtungen ausbreiten. Mit einer gerichteten Belüftung wird das Rauchgas in eine Richtung gedrückt. Bei einer Geschwindigkeit der Luftströmung zwischen 2 bis 4 m/s wird entsprechend den bisherigen Untersuchungen und Modellrechnungen eine Ausbreitung von Rauchgasen gegen die Strömungsrichtung (backlayering) verhindert [Astra 2000]. In Abbildung 11 werden die Verhältnisse schematisch dargestellt.

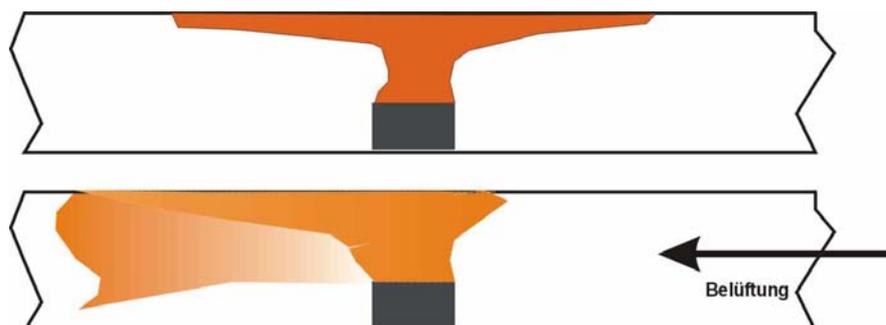


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Längsbelüftung

Infolge der zugeführten Frischluft wird es besonders in der Phase der Brandentwicklung zu einer Abkühlung der Rauchgase durch Mischung mit der Luft kommen. Gleichzeitig mit der Mischung wird allerdings auch die Sicht in dem abströmenden Luft /Rauchgasgemisch verringert bzw. ganz verhindert, so dass es bei dieser Belüftungsart günstiger ist, einen Zeitraum für die Selbstrettung von Personen in Strömungsrichtung (downstream) abzuwarten. Für die Steuerung der Lüftungssysteme im Brandfall sieht die [RABT 2006] besondere Regelungen vor.

In der [RABT 2006] sind weitere mögliche Lüftungssysteme beschrieben, wie z. B. die Halbquerlüftung und die Querlüftung, für welche die Tunnel je nach Art mit einem oder mehreren Lüftungskanäle ausgestattet sein müssen. Bei der Halbquerlüftung wird Frischluft aus einem längs zur Tunnelröhre gelegenen Seitenkanal in Nähe des Bodenniveaus auf die Verkehrsebene geleitet. Die Abluft gelangt in der Regel über die Portale des Tunnels ins Freie. Sie kann aber auch über Lüftungsschlitze in der Decke in einen Abluftkanal und von dort ins Freie abgeleitet werden. Bei der Querlüftung wird die Frischluft über einen längs unter dem Verkehrsraum gelegenen Kanal von unten in Bodennähe zugeführt. Die Abluft wird über Öffnungen in der Decke in einen längs über dem Fahrraum befindlichen Kanal gesaugt und abgeführt. Wirtschaftliche Anwendungsfälle sind nur noch lange Tunnel, bei denen ein kreisförmiges Tunnelprofil zur Verfügung steht.

Alle Lüftungssysteme, auch die letztgenannten, konnten nach [Waninger und Harth 2004] bei großen Brandereignissen im Ernstfall nach den Unfallanalysen mit den anfallenden Brandgasen nur selten fertig werden.

In jedem Fall muss bei vollentwickelten Bränden davon ausgegangen werden, dass die Abluftkanäle die heißen Rauchgase über einen längeren Zeitraum aufnehmen und abtransportieren müssen. Der Abgaskanal muss dem Transport großer Rauchgasmengen bei hohen Temperaturen bis zum Abzugskamin standhalten. Insbesondere die untergehängte Decke wird in diesen Fällen besonderen Belastungen unterworfen.

Da aber offensichtlich bei größeren Bränden eine Entfernung des Rauchgases nicht erreicht werden kann, muss insbesondere in Strömungsrichtung des Rauchgases mit Behinderungen der Sicht, erhöhten Temperaturen und dem Auftreten toxischer Rauchgasinhaltsstoffe gerechnet werden.

Aus der Wärmefreisetzungsrate eines Brandes lässt sich die zeitlich abhängige Rauchgasproduktion abschätzen. Beispiele zeigt Abbildung 12. Die für die Abschätzung notwendigen Vereinfachungen sind:

- ◆ Annahme einer vollständige Verbrennung des Brandstoffes, so kann aus der HRR die pro Zeiteinheit verbrennende Masse an Brandstoff bestimmt werden,
- ◆ keine Berücksichtigung eines Luftüberschusses und
- ◆ Festlegung der Temperatur der erzeugten Rauchgase. Hier wird in Anlehnung an [Carvel et al. 2005] eine Rauchgastemperatur von 600 °C angenommen, weil diese am Übergang der leuchtenden Flamme zu den nicht leuchtenden Rauchgasen als vorherrschend angenommen wird.

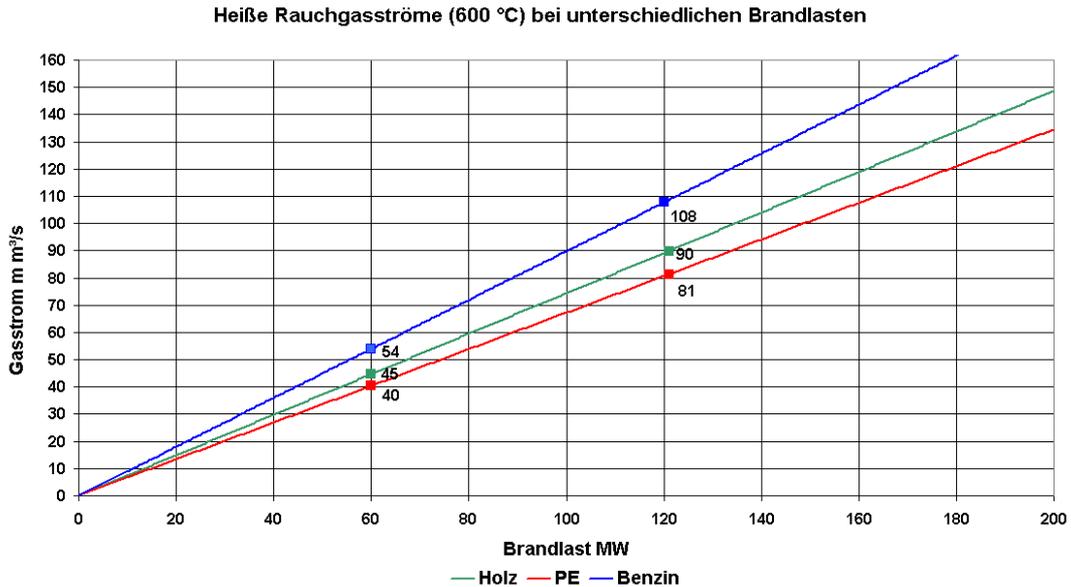


Abbildung 12: Rauchgasströme bei Tunnelbränden

Diese Volumenströme sind deutlich geringer als die experimentell bestimmten bzw. mit Hilfe von Modellen berechneten Werte. Die Abweichungen dürften allerdings auf unterschiedliche Ausgangsangaben zurückzuführen sein. Die von [Haack 2001] angegebenen Rauchgasströme werden durch die nachfolgende Abbildung 13 wiedergegeben. Leider wurden diese Werte vom Autor nicht näher diskutiert.

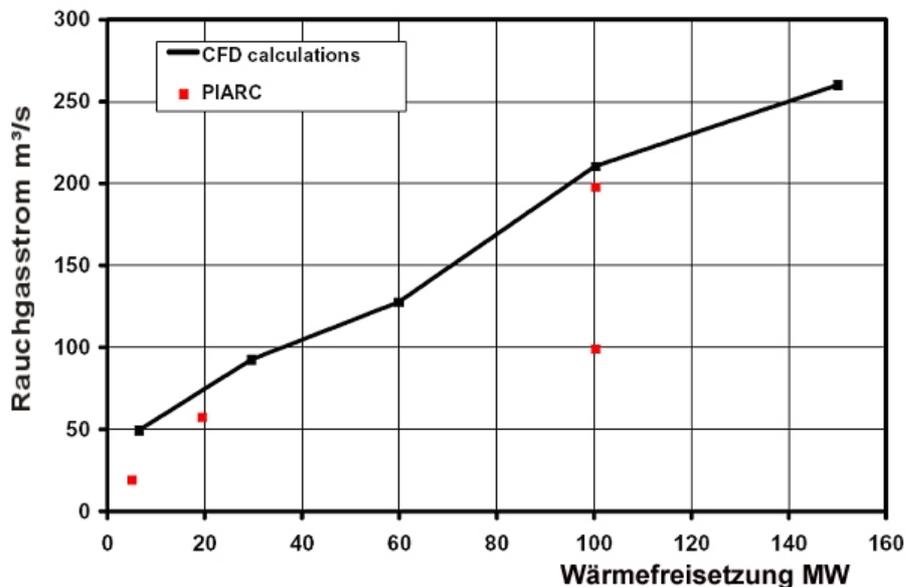


Abbildung 13: Berechnete und gemessene Rauchgasströme in Tunneln

Die stöchiometrische Berechnung des Volumenstromes der Rauchgase ohne Berücksichtigung von Luftüberschüssen, bei Zuordnung einer minimalen Temperatur von 600 °C und bei vollständiger Verbrennung dürfte offensichtlich den unteren Grenzwert für das Abschätzen der zu erwartenden Volumenströme darstellen. Im Verlauf des Abgasstromes kühlen die Rauchgase ab. Da aber heiße Rauchgase zunächst vorzugsweise im Deckenbereich abströmen, wird die Ausbreitung schnell sein. Infolge der Abkühlung kommt es zunehmend zu einer Vermischung zwischen der oberen Rauchgasschicht und der unteren kälteren Schicht, so dass sich in einer Entfernung von etwa 200 bis 300 m nach dem Brandherd beide Schichten vermischt haben. In diesem Bereich wird die Sichtweite maximal verringert.

3.1.5 Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung eines Brandes wird durch die Temperatur und das Emissionsverhalten der heißen Gasschicht bestimmt, in der die Verbrennungsreaktion stattfindet. Die eigentliche Reaktion des Brandstoffes mit dem Luftsauerstoff ist begrenzt auf ein sehr kleines Volumen. In diesem Volumen erreichen die Konzentrationen beider Komponenten nahezu ein stöchiometrisches Verhältnis, so dass die Reaktionsgeschwindigkeit maximal wird. Infolge des Wärmeübergangs in der Gasschicht wird die Energie sehr schnell an die Umgebung abgegeben und es stellt sich eine mittlere Temperatur ein, die mit normalen Thermoelementen messbar wird. Aufgrund der örtlich unterschiedlichen Zonen der Verbrennungsreaktion und des starken thermischen Auftriebes der Reaktionsgase werden in räumlichen Bereichen nahezu konstante Temperaturen gemessen. Die Temperaturen der heißen Reaktionsprodukte regen die bei der Verbrennung entstehenden Rußpartikel zur Emission von Lichtstrahlung an. Diese leuchtenden Bereiche werden allgemein als Flammen bezeichnet. Sie sind aber weder stofflich noch energetisch homogen. Trotzdem kann man die mittlere Temperatur einer Flamme näherungsweise zur Abschätzung der Wärmestrahlung verwenden. Bei ausreichender Schichtdicke der Flamme entspricht die abgestrahlte Energie näherungsweise der Strahlung eines schwarzen Körpers. Somit gilt für die zwischen zwei als schwarze Körper betrachteten Flächen abgestrahlte Energie die vereinfachte Gleichung (5) von Stefan-Boltzmann

$$Q_{12} = A_1 \phi_{12} C_s \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (5)$$

Das Diagramm in Abbildung 14 dient zur Ermittlung der Einstrahlzahl von parallel angeordneten rechteckigen Platten, mit deren Hilfe zum Beispiel der direkte Strahlungsaustausch ermittelt werden kann.

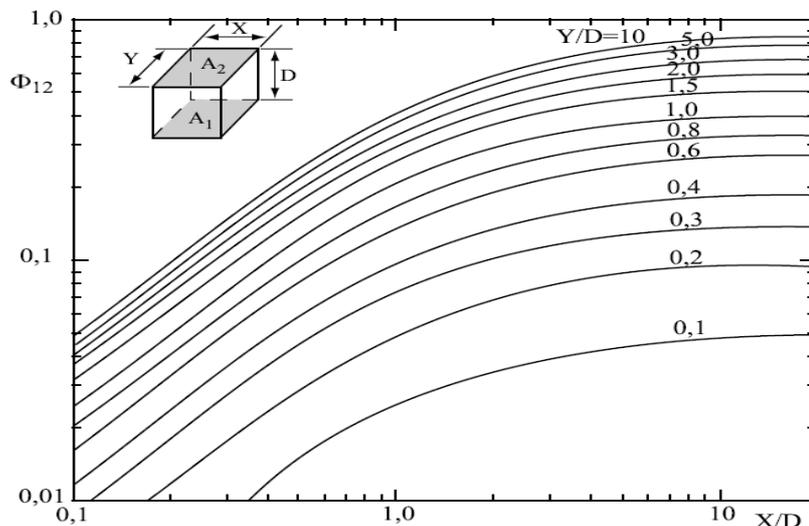


Abbildung 14: Einstrahlzahlen zwischen parallel angeordneten rechteckigen Platten [VDI 1977]

Die maximale Strahlung bei unterschiedlichen Entfernungen von der Flamme wird im interessierenden Bereich mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 15 dargestellt. Bei der Erstellung der Diagramme wurde die Flammenstrahlung als schwarzer Körper angesehen und die in Abhängigkeit von der Temperatur der Flamme in verschiedener Entfernung auftretende Strahlung berechnet. Die Einstrahlzahlen wurden aus dem Diagramm (Abbildung 14) ermittelt. Anschließend wurden die berechneten Kurven geglättet. Aufgrund der hohen Wärmestrahlung im unmittelbaren Nahbereich der Flammenfront wurde die Wärmestrahlung im Diagramm erst ab 10 m Entfernung von der Flamme dargestellt. Es wurde als wesentlich erachtet, dass der Bereich mit erträglichen Strahlungswerten für die Einsatzkräfte sicher abgelesen werden kann.

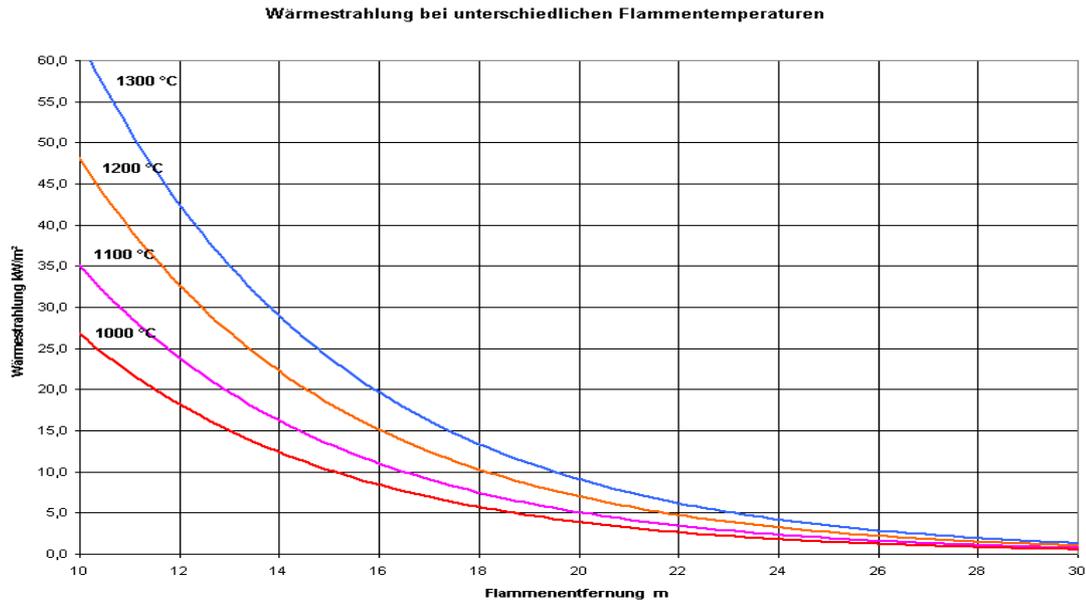


Abbildung 15 : Wärmestrahlung in verschiedenen Entfernungen von der Flamme

Es ist erkennbar, dass sich bei den im Tunnel durch einen voll entwickelten Brand herrschenden Flammentemperaturen, geschützte Einsatzkräfte auf maximal 24 m nähern können, wenn die in Tabelle 17 genannten Grenzwerte berücksichtigt werden. Eine weitere Annäherung erfordert in jedem Fall einen Strahlungsschutz, der durch einen Wasserstrahl in Richtung der Flammen verteilt über den gesamten Querschnitt des Tunnels die Strahlung absorbieren kann oder durch einen kompakten Schutzschirm, der Einsatzkräfte und Löschgerät vor Strahlungsexposition schützt.

[Koinig 1999] beschreibt die Auswirkungen der Wärmestrahlung auf Einsatzkräfte der Feuerwehr. Die nachfolgende Tabelle 17 ist aus seiner Arbeit entstanden.

Tabelle 17: Auswirkungen der Wärmestrahlung auf Einsatzkräfte der Feuerwehr

| Wärmestrahlung kW/m ² | Auswirkungen auf Einsatzkräfte |
|----------------------------------|--|
| 1,5 | Einsatzkräfte können längere Zeit eingesetzt werden. Es ist ausreichend Zeit zum Abfahren von Anlagen. |
| 4,5 | Einsatzkräfte können mit ungekühlten Schutzanzügen eingesetzt werden |
| 8 | Einsatzkräfte können kurzzeitig und nur mit speziell gekühlten Schutzanzügen eingesetzt werden |

Vergleichbar sind die Angaben von [Lawson 1996]. Der von ihm angegebene Wert ergibt nach 30s Verbrennungen 2. Grades und liegt bereits in 6 m Entfernung zur Tür vom Brandraum vor. Die Beeinträchtigung von Einsatzkräften liegt ebenfalls in der Größenordnung von etwa 5 kW/m². Aus den Angaben des Autors über die von der Wärmestrahlung abhängige Zeittoleranz bis zur Ausbildung einer Verbrennung 2. Grades am menschlichen Gewebe wurde die in Abbildung 16 aufgeführte Grafik erstellt.

Zeittoleranz menschlichen Gewebes bis zur Verbrennung 2. Grades

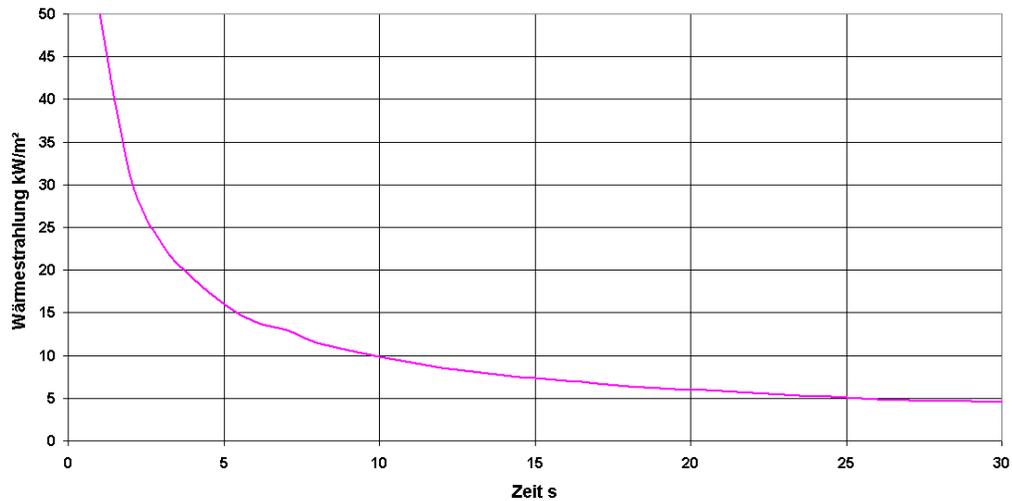


Abbildung 16: Zeittoleranz menschlichen Gewebes bis zur Verbrennung 2. Grades

Um der Wärmestrahlung bei Bränden in Tunneln zu entgehen, sollte vor allem die Anfangsphase eines Brandes mit seinen deutlich geringeren Flammentemperaturen genutzt werden und erfordert möglichst geringe Einsatzzeiten. Im Fall eines entwickelten Vollbrandes wird die Wärmestrahlung zu einem wesentlichen Faktor der Brandbekämpfung. Sie erfordert zu diesem Zeitpunkt mindestens 1/3 des verfügbaren Löschwassers zur Kühlung und Strahlungsabsorption.

3.1.6 Wärmefreisetzungsraten bei Bränden in Tunneln

Bei Brandversuchen in Tunneln wurden unter definierten Bedingungen fast immer die Brandleistungen bestimmt. Die folgenden Beispiele sollen einen Überblick über die erreichten Brandleistungen erbringen, wobei allerdings die Randbedingungen nur zum Teil vollständig beschrieben sind.

Nach [Haack 2001] werden aus den internationalen Versuchen und Abschätzungen die in Tabelle 18 aufgeführte Brandleistungen abgeleitet.

Tabelle 18: Brandleistungen bei Brandversuchen nach [Haack 2001]

| | Brandleistung MW | | | | | | | | |
|------------------------|------------------|---------|----------|----------|----------|------------|-----------------|------------|------------|
| | PIARC | | RABT | CETU (F) | NFPA 502 | Brandtests | | | Erwartung* |
| | 1997 | 1999 | 1994 | 1996/97 | 1998 | real | Eureka | Rune-hamar | |
| Pkw | 5 | | | 2,5 | 5 | 1,5 - 2 | Ingason Bericht | | |
| Pkw (gr) | | | | 5 | | | | | |
| Van (Plastik) | | 2,5 - 8 | | | | 5-6 | 2,5 - 9 | | 3 - 10 |
| 1-2 Pkw | | | 6 - 10 | | | | | | |
| 2-3 Pkw | | | | 8 | | | | | |
| Van | | 15 | | 15 | | | | | |
| 1 Bus (öffentlich) | | 20 | | | 29 - 34 | 29 - 34 | | | 36 |
| Bus/Lkw ohne Gefahrgut | 20 | | 20 - 30 | 20 | 20 | | | | 20 |
| HGV | | | | 30 | | 100 - 130 | 128 | | 150 - 400 |
| Benzintanker | 100 | 100 | 50 - 100 | 200 | 100 | | 20 - 100 | | 120 - 300 |
| Benzinlache 400 l | | | | | | | | | 50 |
| Benzinlache 800 l | | | | | | | | | 100 |
| Mischladung 2900 kg | | | | | | 15 - 17 | | | |
| versch. HGV | | | | | | | | 71 - 223 | |
| Waggon | | | | | | 12 - 47 | | | 3 - 100 |

* von den maximalen Versuchswerten abgeleitet

[Ingason und Lönnermark 2004] fassten verschiedene Untersuchungen zu Tunnelbränden mit ihren wesentlichen Randbedingungen in der nachfolgend gezeigten Tabelle 19 zusammen.

Tabelle 19 : Brandleistungen bei verschiedenen Tunnelbrandversuchen

| Art der Fahrzeuge, Test, Test-Nr. u = Längslüftung m/s | Energie- inhalt GJ | Peak HRR MW* | Zeit bis Peak min | Referenz |
|--|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Pkw | | | | |
| 3 Pkw-Tests (Baujahr ca. 1970) | 4 | 1,5; 1,8; 2 | 12; 10; 14 | Mangs und Keski-Rahkonen |
| Renault Espace 1988, Eureka 499, u = 0,4 m/s | 7 | 6 | 8 | Steinert |
| Citroen BX 1986 | 5 | 6 | 15 | Ship und Spearpoint |
| Austin Maestro | - | 8,5 | 16 | dto |
| Opel Kadet, zweiter Benelux-Test Nr. 6 und 7 u = 0 und 6 m/s | - | 4,8 4,7 | 11 38 | Lemair et al. |
| Test mit je 1 Pkw (Renault, Peugeot, Citroen, Ford, Opel, Fiat, VW) (1980/90) | 2,1; 3,1 4,1; 6,7 | 3,5; 2,1 4,1; 8,3 | 10; 29 26; 25 | Joyeux |
| Test 1 Pkw (Trabant, Austin, Citroen) | 3,1; 3,2; 8 | 3,1; 1,7; 4,6 | 11; 27; 17 | Steinert |
| 2 Pkw (Renault, Peugeot, Citroen, Ford, Opel, Fiat, VW) (1980/90) | 8,5; 7,9; 8,4; - | 1,7; 7,5 8,3; 10 | - ; 13 - ; - | Joyeux |
| 2 Pkw (Polo/Trabant, Peugeot/Trabant, Citroen/Trabant, Jetta/Ascona) | 5,4; 5,6; 7,7; 10 | 5,6; 6,2; 7,1; 8,4 | 29; 40; 20; 55 | Steinert |
| 3 Pkw (Golf, Trabant, Fiesta) | - | 8,9 | 33 | Steinert |
| Busse | | | | |
| Volvo Schulbus, 12m lang, 40 Sitze, Eureka 499, u = 0,3 m/s | 41 | 29 | 8 | Ingason et al. |
| Bus, Shimuzu Tunnel, u = 3 m/s | - | 30 | 7 | Kunikane et al. |
| Lkw HGV | | | | |
| Lkw-Ladung 10,9 t, Holzpaletten (82%) Plastikpaletten (18%), Runehamar, Test 1 u = 3 m/s | 240 | 203 | 18 | Ingason und Lönnermark |
| Lkw-Ladung 6,8 t, Holzpaletten (82%), PUR-Matratzen (18%), Runehamar, Test 2, u = 3 m/s | 129 | 158 | 14 | Ingason und Lönnermark |
| Lkw 8,5 t, Möbel, Zubehör, Gummireifen, Runehamar Test 3, u = 3 m/s | 152 | 125 | 10 | Ingason und Lönnermark |
| Lkw-Attrappe 3,1 t, Wellpapier, Plastbecher (19%), Runehamar Test 4, u = 3 m/s | 67 | 70 | 14 | Ingason und Lönnermark |
| Leyland DAF 310ATi Lkw, 2 t Möbel, Eureka 499, u = 3 m/s | 27 | 110 | 18 | Grant und Drysdale |
| Lkw, 72 Holzpaletten, 2. Benelux-Test, Test 14, u = 1- 2 m/s | 19 | 25 | 12 | Lemair et al. |
| Lkw, 36 Holzpaletten, 2. Benelux-Test, Test 8,9,10 ; u = 0; 4-6; 6 m/s | 10 | 13; 19; 16 | 16; 8; 8 | Lemair et al. |
| Lkw-Attrappe (STL), Eureka 499, u = 0,7 m/s | 65 | 17 | 15 | Ingason et al. |

*Maximum der Wärmefreisetzungsrate in MW

Von [Ingason 2005] wurde laut [Lönnermark 2005] eine Zusammenfassung der verfügbaren Daten aus Versuchen vorgenommen und verschiedenen Fahrzeugen zugeordnet. In der nachfolgenden Tabelle 20 sind diese Daten zusammengefasst.

Tabelle 20: Zuordnung der Versuchsergebnisse zu Fahrzeugtypen

| Fahrzeug | Anzahl der Tests | Energieinhalt GJ | Peak HRR MW | Mittlerer Peak HRR | Zeit bis zum Peak min |
|----------|------------------|------------------|-------------|--------------------|-----------------------|
| Pkw | 15 | 2 - 8 | 1,5 - 8,5 | 4,1 | 10 - 38 |
| 2 Pkw | 7 | 5 - 10 | 5,6 - 10 | 7,6 | 13 - 55 |
| 3 Pkw | 1 | unbekannt | 8,9 | 8,9 | 33 |
| Bus | 2 | 41 ^{a)} | 29 - 30 | 29,5 | 7 - 8 |
| HGV | 10 | 10 - 244 | 13 - 202 | - ^{b)} | 8 - 18 |

^{a)}Die Information über den Energieinhalt war nur für einen Bus verfügbar. Der Wert von 41 GJ korrespondiert mit dem Peak der HRR von 29 MW

^{b)}Die Tests waren zu unterschiedlich für eine Mittelwertbildung

In einer Analyse aller verfügbaren Daten für die HRR und den Energieinhalt der Brandobjekte kommt [Lönnermark 2005] zu dem Ergebnis, dass die HRR bei Tunnelbränden mit dem verfügbaren Energieinhalt korreliert. Aufgrund der unterschiedlichen Größenordnungen wurde die Korrelation beider Größen für Pkw und HGV getrennt ausgeführt. Grundsätzlich wurde die in Gleichung (6) formulierte Abhängigkeit gefunden:

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{max} = c \cdot HRR \quad ; \quad c_{Pkw} = 0,868 MW / GJ \quad \text{und} \quad c_{HGV} = 0,866 MW / GJ \quad (6)$$

Bei der grafischen Darstellung der Abhängigkeiten für Pkw und HGV (Abbildung 17) beginnt die lineare Regressionsgerade in beiden Fällen im Ursprung. Der einzige vollständige Datensatz für einen Busbrand ergab einen Faktor von $c_{Bus} = 0,7 MW/GJ$.

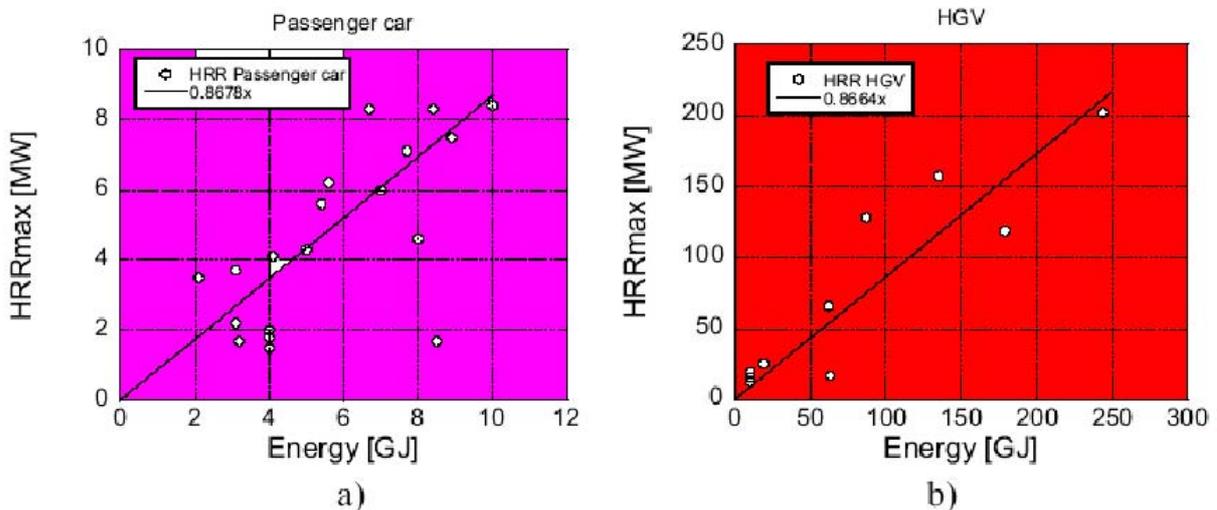


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen HRR und Energieinhalt für a) Pkw b) HGV [Lönnermark 2005]

In diesem Zusammenhang leitete [Lönnermark 2005] weiterhin ab, dass mit zunehmendem Energieinhalt des Brandherdes auch die Temperatur des Brandes ansteigen muss. Aus diesem Grund wurde für die Tests im Runehamar-Tunnel eine eigene Temperaturkurve entwickelt (Abbildung 18).

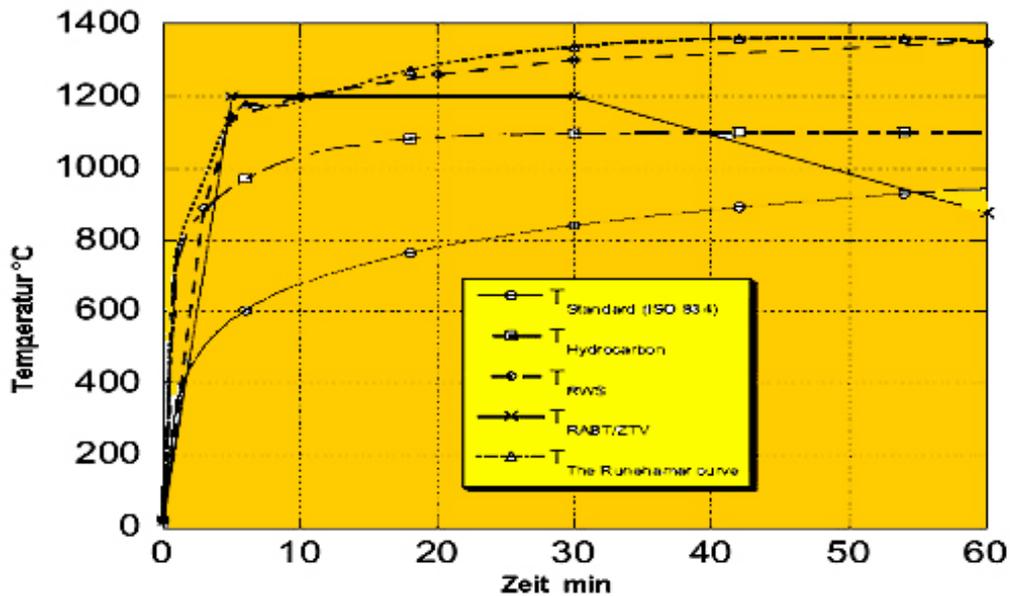


Abbildung 18: Darstellung der Runehamar-Kurve im Vergleich zu den anderen gebräuchlichen Designkurven

Aus der Darstellung wird deutlich, dass mit zunehmendem Energieinhalt des Brandherdes und damit zunehmenden Frachtmengen brennbarer Stoffe auf den Kraftfahrzeugen die Gefahr höherer Brandleistung und der damit verbundenen Parameter eines Brandes resultieren muss. Der wachsende Verkehr und die Masse der bewegten Güter bringen einen weiteren Faktor der Brandentwicklung zum Tragen. Es entstehen zunehmend Brände, an denen mehrere Fahrzeuge beteiligt sind. Großflächige, sich über mehrere Fahrzeuge erstreckende Brände erschweren die Brandbekämpfung erheblich, weil die Einsatzkräfte in diesen Fällen den Brandherd mit dem Löschmittel nicht mehr vollständig erreichen können. Diese Brände erzeugen aber auch deutlich höhere Brandleistungen, wie die Abschätzungen zur HRR einiger realer Brände in Tunneln mit mehreren Fahrzeugen ergaben. [Lönnermark 2005] veröffentlichte die in Tabelle 21 aufgeführten Abschätzungen von [Ingason 2003] und [Bettelini et al. 2003].

Tabelle 21: Geschätzte Brandleistungen von realen Tunnelbränden mit mehreren Fahrzeugen [Lönnermark 2005]

| Ereignis | Fahrzeugtyp | Angenommener Energieinhalt GJ | Angenommener Peak HRR MW | Konsequenzen | |
|--------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------------|----------------------|
| | | | | Personen | Tunnel |
| Eurotunnel | 10 HGV | 2200 | 370 | 30 Verletzte | Deckenschaden |
| Mont Blanc | 14 HGV, 9 Pkw | 5000 - 7000 | 380 | 39 Tote | 3 Jahre geschlossen |
| Tauern | 16 HGV, 24 Pkw | 4000 - 4500 | 300 - 400 | 12 Tote | 3 Monate geschlossen |
| St. Gotthard | 13 HGV, 10 Pkw | 1400 – 2700 ^{a)} | > 100 | 11 Tote | 2 Monate geschlossen |

^{a)} Annahme: 100 bis 200 GJ pro HGV und 5 GJ pro Pkw

3.1.7 Einfluss von Verkehr und Ladung bei Tunnelbränden

Unbestritten ist, dass der Verkehr auf den Straßen stetig zunimmt. Diese Aussage betrifft sowohl den Personenverkehr als auch den Gütertransport. Die laufenden Veröffentlichungen entsprechender statistischer Daten durch das [Statistisches Bundesamt 2008] belegen diese grundsätzlichen Aussagen (Tabelle 22).

Tabelle 22: Beförderungsleistungen und Fahrzeugbestand in Deutschland

| Verkehrsart | Jahr | | |
|--|------------|------------|-------------|
| | 2005 | 2006 | 2007 |
| Personenverkehr Linienverkehr | | | |
| Beförderungsleistung, Mill./Mio.Pkm | 126 817,8 | 131 201,3 | * 99 501,8 |
| Fahrgäste Mill. | 10 184,9 | 10 382 | * 7 504,2 |
| Güterverkehr | | | |
| Eisenbahn (1000 t) | 317 294 | 346 118 | 361 116 |
| Straßenverkehr (1000 t) | 2 764 983 | 2 919 325 | * 2 560 452 |
| Pkw-Bestand (privat) | 45 375 526 | 46 090 303 | 46 569 657 |
| Lkw-Bestand normal | 2 572 142 | 2 573 077 | 2 604 061 |
| Sattelzugmaschinen | 185 364 | 192 124 | 200 272 |
| Busse | 85 508 | 83 904 | 83 549 |

* bis III. Quartal

Trotz steigender Verkehrsdichte und steigender Masse an Transportgütern hat sich die Anzahl der Verkehrstoten und der bei Unfällen verletzten Personen in den letzten Jahren kontinuierlich verringert [Statistisches Bundesamt 2007]. Die Abbildung 19 gibt die Anzahl der Verkehrstoten und die Anzahl der Verletzten wieder.

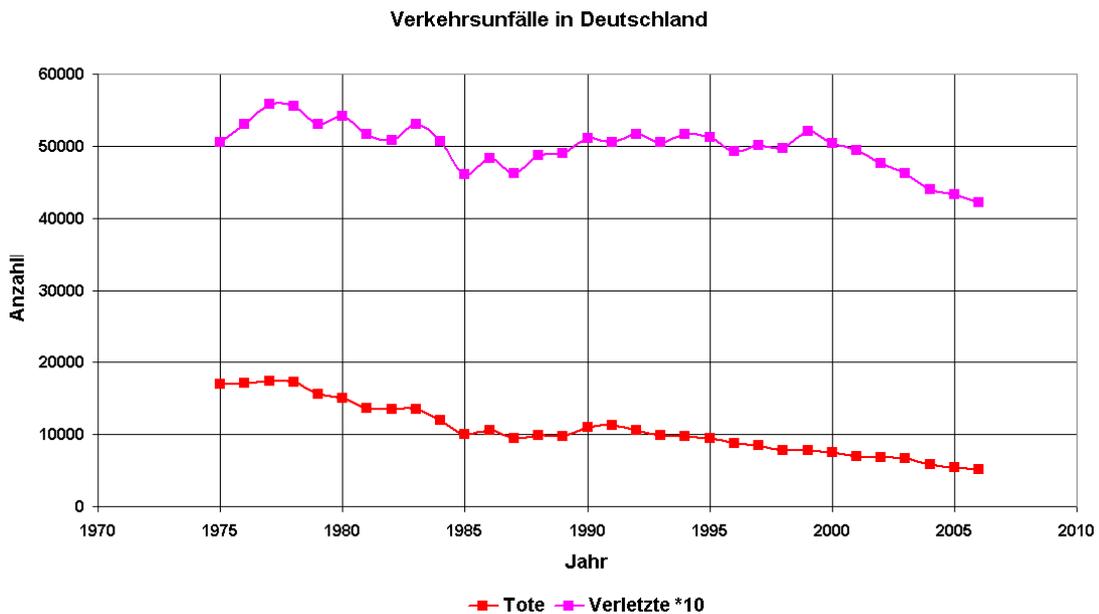


Abbildung 19: Verletzte Personen und Todesfälle bei Verkehrsunfällen in Deutschland

Laut [Baltzer et al. 2001] ist die Unfallrate unmittelbar vor dem Tunnelportal um 20% höher als auf einem durchschnittlichen offenen Abschnitt einer BAB. Im Gegensatz dazu sind die Werte für den Innenbereich eines Tunnels um den Faktor 1,5 geringer. Diese Aussage beruht auf einer norwegischen Studie. Im Gegensatz dazu werden in der europäischen Literatur auch deutliche Hinweise gegeben, dass in Tunneln die Todesgefahr etwa doppelt so hoch ist wie im normalen Straßenverkehr. Die [KfV 2005] und [Robatsch und Nussbaumer] schätzen das Risiko, bei einem Tunnelunfall getötet zu werden, etwa doppelt so hoch ein wie auf Autobahnen. Es wird allerdings auch eingeschätzt, dass die Wahrscheinlichkeit, im Tunnel zu verunglücken, wesentlich geringer ist als auf Autobahnen, Schnell- und Landesstraßen im Freiland. Wenn allerdings in einem Tunnel ein Unfall passiert, fällt er wesentlich schwerer aus. Somit ist offensichtlich die Unfallrate in Tunneln nicht allein ausschlaggebend für die Risiken in Tunneln. Es muss auch die Schwere

des Unfalls mit berücksichtigt werden. Die war schließlich der Grund für die Untersuchung von Tunnelunfällen in Österreich. Es wurde festgestellt, dass Tunnel mit Gegenverkehr ein fast doppeltes Risiko bei einem Unfall getötet zu werden aufweisen als Tunnel mit Richtungsverkehr. Die ermittelten Zahlen ergaben:

- ◆ für Tunnel mit Gegenverkehr 17 Tote / 1 Milliarde Fahrkilometer
- ◆ für Tunnel mit Richtungsverkehr 8 Tote / 1 Milliarde Fahrkilometer

Die Auswertung der Untersuchung von [Trottet at al. 2001] an 170 Tunnelunfällen belegen, dass Unfälle in einem Tunnel zwar seltener sind als auf offener Strecke, doch die Folgen sind vor allem bei einem Brand häufig verheerend. Die ersten zehn Minuten nach dem Unfall sind für das Überleben der Reisenden entscheidend, denn in fast allen Fällen füllt sich nach drei bis zehn Minuten der Tunnel mit dichtem Rauch.

Die ausführlichen Untersuchungen der einzelnen Unfälle zeigten ähnliche Mechanismen im Unfallhergang auf. Diese Ähnlichkeiten sind insbesondere bei Schlüsselereignissen der Unfälle anzutreffen:

- ◆ Anzahl der Akteure und Schlüsselereignisse des Unfalls sind begrenzt
- ◆ Es bestehen gemeinsame Kausalbeziehungen zwischen den Schlüsselereignissen der untersuchten Unfälle
- ◆ Unfallfolgen hängen hauptsächlich vom Vorhandensein paralleler Ereignisse ab (z.B. Fortschreiten des Feuers und der Evakuierung der Passagiere bei Bränden).

Die Ausgangssituationen bei Unfällen können auf vier Fälle zusammengefasst werden :

- ◆ verlängerter Stillstand des Fahrzeugs im Tunnel,
- ◆ Stillstand nach einem Aufprall,
- ◆ Stillstand aufgrund eines beginnenden Brandes,
- ◆ Stillstand aufgrund einer gefährlichen Situation.

Insgesamt resultiert daraus, dass die Zeitspanne, in der parallele Ereignisse nach dem Unfall eintreten, von größter Bedeutung ist und dies kann sich insbesondere in einer erhöhten Rauchentwicklung, toxischen Belastung, in Explosionen negativ, oder der Selbstrettung von Personen positiv niederschlagen. Deshalb erfordert die Simulation eines solchen Unfallmechanismus eine Darstellung der parallelen Dynamik und der zeitlichen Logik der Ereignisse. Das betrifft insbesondere die Maßnahmen der Tunnelüberwachung, die Zuführung der Rettungskräfte, die Entwicklung des Brandes und der Rauchgase u.a., wobei die räumliche Eingrenzung einen wichtigen Faktor darstellt.

Ein weiterer Faktor bei Gefahrereignissen in Tunneln ist die Auslastung der Ladeflächen der Nutzfahrzeuge. Insbesondere durch Optimierung der Transportprozesse aber auch finanzielle Beeinflussung, wie die Fahrzeug-Maut, werden Fahrzeuge insgesamt deutlich stärker ausgelastet. Bereits ab 1999 untersuchten [Kämpf et al. 2001] die Möglichkeiten zur Verknüpfung der Wirkungskomponenten

- ◆ Auslastung der Verkehrsmittel,
- ◆ Kapazität der Infrastruktur und
- ◆ Verknüpfung der Verkehrsträger.

Beim Güterverkehr ermittelten sie eine Verbesserung der mittleren Auslastung durch verstärktes Flottenmanagementsystem bis 2005 um 2 bis 3 % und bis 2010 um weitere 2%. Im Maximum wurden in Verbindung mit anderen Maßnahmen (Maut) etwa 4 % Steigerung erwartet. Diese

Aussagen bedeuten, dass die Nutzlasten der Fahrzeuge nahezu ausgeschöpft sind. Im Fall des Transportes von brennbarem Material wird ein kleiner Lkw fast 3 t Ladung, ein Trailer (HGV) aber etwa 25 t bis 30 t Ladung befördern. Bei einem Heizwert von 18,5 GJ/t würde damit im Brandfall ein Wärmefreisetzungspotenzial von 460 GJ bis 550 GJ zur Verfügung stehen. Wird zwischen verfügbarer Energie und erreichbarer HRR die Korrelationsgleichung von [Lönnermark 2005] angesetzt, so wären beim Brand eines HGV als maximaler Peak der HRR etwa 400 - 500 MW zu erwarten. Dass bei derartigen Wärmefreisetzungen die Brandregime umschlagen und sich Lüftungsgesteuerte Brände mit allen ihren negativen Wirkungen einstellen würden, versteht sich von selbst. Dieser Trend wird sich mit zunehmendem Verkehr und der Auslastung der Infrastruktur noch weiter fortsetzen. Möglicherweise werden die neuen Jumbotrailer eine weitere Steigerung der potentiellen Energieinhalte pro Ladungsfläche erbringen.

Einen weiteren Schwerpunkt stellt die Gefahr der Staubildung nach einem Unfall dar. Unter Staubildung wird ein stockender zähflüssiger Kolonnenverkehr mit deutlicher Verminderung der zulässigen Fahrgeschwindigkeit und zeitweiligem Stop and Go oder absolutem Stillstand bezeichnet [Stauchfachstelle 2005]. Die maßgebenden Parameter zur Bestimmung der Verkehrsqualität auf Straßen sind gegeben durch:

- ◆ Verkehrsstärke (Fahrzeug / Stunde)
- ◆ Verkehrsdichte (Fahrzeug / Kilometer)
- ◆ Geschwindigkeit (Kilometer / Stunde).

Aufgrund der möglichen Folgen eines Staus sollte die Verkehrsqualität in Tunneln ein wesentliches Kriterium der Verkehrsüberwachung sein, um einerseits kritische Zeiträume der Staubildung zu erkennen und andererseits bereits bei Veränderungen der Verkehrsqualität direkten Einfluss auf die Verkehrsführung zu nehmen. In der Phase der Ausbildung eines Verkehrsstaus ist die Gefahr eines Unfalles besonders hoch. Die hohe Verkehrsdichte führt potentiell zu einer höheren Stufe der Gefährdung und im Fall eines Brandes kann davon ausgegangen werden, dass grundsätzlich mehrere Fahrzeuge involviert sein werden.

Von [Herzke und Mieling 2005] sind Schadenslagen mit größerem Ausmaß durch Verkettung mehrerer unglücklicher Ereignisse vorstellbar. Dabei ist jedoch auch die Ereignishäufigkeit zu betrachten, die sich in Extremsituationen in einem nicht mehr zu diskutierenden Bereich (z. B. 1 Ereignis in mehr als 1.000.000 Jahren) bewegt. Dieser Aussage widersprechen die angeführten Großereignisse in Tunneln von [Carvel et al. 2005], die sich auf einen Ereigniszeitraum von etwa 25 Jahren beschränken und bei denen in der Mehrzahl der Fälle mehrere Fahrzeuge beteiligt waren.

3.1.8 Gefahrgüter bei Bränden

Für Brände in Tunneln ist der Transport von Gütern der Gefahrgutklasse 3 „entzündbare flüssige Stoffe“ gesondert zu betrachten. Brennbare Flüssigkeiten sind in den Ereignisszenarien für Tunnel explizit genannt und charakterisieren neben dem Ereignisszenario Brand mit brennbarer Flüssigkeit auch das Ereignisszenario der Dampfexplosion (VCE). In diesem Kapitel wird ausschließlich auf das Ereignisszenario Brand eingegangen.

Grundsätzlich ist bei Bränden brennbarer Flüssigkeiten, auch bei Flüssigkeiten mit höherem Flammpunkt, von einer sehr schnellen Brandentwicklung auszugehen. Es sollte die HC-Kurve zur Beurteilung der Brandentwicklung herangezogen werden. Im Vollbrand werden Gastemperaturen im Flammenbereich von mehr als 1200 °C erreicht. Große Brandstoffmengen dürften der Kurve der Runehamar-Testreihe folgen und im Vollbrandstadium etwa 1350 °C erreichen.

Der größte Anteil brennbarer Flüssigkeiten im Güterverkehr bezieht sich auf Kraftstoffe (Benzin, Dieselmotoren, Kerosin) Heizöle und Alkohol. Der übrige Anteil besteht vor allem aus Industriechemikalien, die in der Regel in Gefahrgutcontainern für brennbare Flüssigkeiten transportiert werden. Für diese Transportform trifft die Aussage von [Herzke und Mieling 2005]

zu, dass die Tankcontainer besonders geschützt sind und das Bersten des Behälters erhebliche kinetische Energie erfordert.

Die Behälter von Tankfahrzeugen für Kraftstoffe, Heizöle, Alkohole und eine Reihe weiterer Chemikalien müssen nach ADR Kapitel 6.8 gestaltet sein. Das bedeutet, es können für die ortsbeweglichen Tanks unterschiedliche, einwandige Materialien (Edelstahl, Aluminiumlegierungen) verwendet werden. Für die Werkstoffe sind entsprechende Materialdicken festgelegt. Für spezielle Chemikalien sind in ADR Kapitel 6.8.4 gesonderte Festlegungen getroffen. So müssen Tankkörper für verflüssigte Gase als Druckbehälter aus Edelstahl gefertigt sein, eine Festlegung über die Verwendung von Doppeltanks besteht nicht. Die Tanks stellen einen geschlossenen Laderaum dar, in dem besondere Einbauten das Schlingern der Fahrzeuge während des Fahrens verhindern. Anforderungen zur technischen Ausrüstung der Tankfahrzeuge finden sich auch in der TRbF 60 – ortsbewegliche Behälter.

Werden Tankfahrzeuge in einen Unfall verwickelt, so kann je nach Grad der Schädigung des Tankfahrzeuges die brennbare Flüssigkeit freigegeben werden. Brände mit Tanklastzügen auf Landstraßen und Autobahnen sind relativ häufig. Einer der folgenschwersten Unfälle mit einem Tanklastzug war der Unfall von Langenweddingen 1967 [GEBE 2005], bei dem ein Tankfahrzeug bei einer Kollision mit einem Zug völlig zerstört wurde. Die 15 m³ Benzin wurden schlagartig freigesetzt und zerstörten das Bahnhofsgelände und die Waggons des Personenzuges. Bei diesem Unglück fanden 77 Personen den Tod.

[Persson 2002] legte seiner qualitativen Risikoanalyse zur Beurteilung der Gefährdungen bei Gefahrguttransporten für jedes zu betrachtende Szenario eine Fehlerbaumbetrachtung zugrunde, die von Rasmussen 1994 übernommen wurde (Abbildung 20). Den im Fehlerbaum auftretenden Szenarien wurden Wahrscheinlichkeiten zugeordnet und die möglichen Frequenzen ihres Auftretens angegeben. Die Parameter der Lachenbrände sind in Tabelle 23 beschrieben.

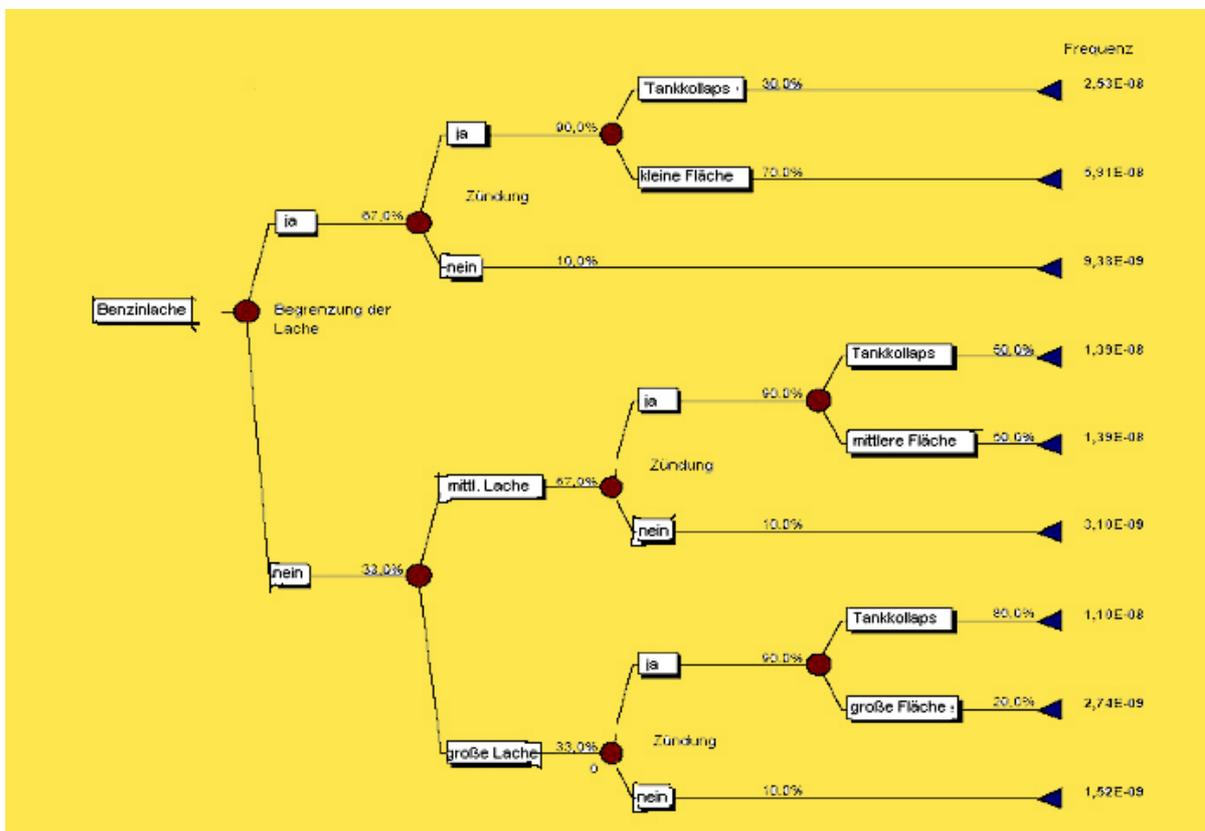


Abbildung 20: Fehlerbaum für Szenarien mit brennbarer Flüssigkeit

Trotz der geringen Wahrscheinlichkeiten des Auftretens der Szenarien kann man davon ausgehen, dass im Fall einer Kollision mit einem dieser im Fehlerbaum aufgezeigten Szenarien zu rechnen ist.

Tabelle 23: Beschreibung der Parameter für die Lachenbrände im Fehlerbaum [Persson 2002]

| Lachengröße | Fläche der Lache m ² | HRR MW |
|----------------|---------------------------------|--------|
| kleine Lache | 10 | 17 |
| mittlere Lache | 30 | 50 |
| große Lache | 100 | 170 |
| Tankkollaps | 180 | 300 |

Die Berechnung der HRR wurde von [Persson 2002] aus einer Arbeit von Karlsson 1999 übernommen. Für die Abbrandrate wurde dabei ein Wert von $r_{Brd} = 0,055 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ($3,3 \text{ kg/m}^2\text{min}$) angenommen. Für die Verbrennungseffizienz von Benzin wurde der Faktor $\chi = 0,7$ gewählt. Die Gleichung (7) zur Berechnung der HRR lautete:

$$\dot{Q}_{Brd} = HRR = A_{Brd} \cdot r_{Brd} \cdot \chi \cdot \Delta H_H \quad (7)$$

Bei den in Tabelle 23 aufgeführten Parametern entspricht bereits die kleine Lache mit der HRR von 17 MW einem Van und liegt damit höher als normale Pkw. Die bei Lachenbränden entstehenden Abgasvolumenströme (Abbildung 21) wurden errechnet unter Zugrundelegen einer stöchiometrischen Heptan-Verbrennung und eines Effizienzfaktors von $\chi = 0,7$.

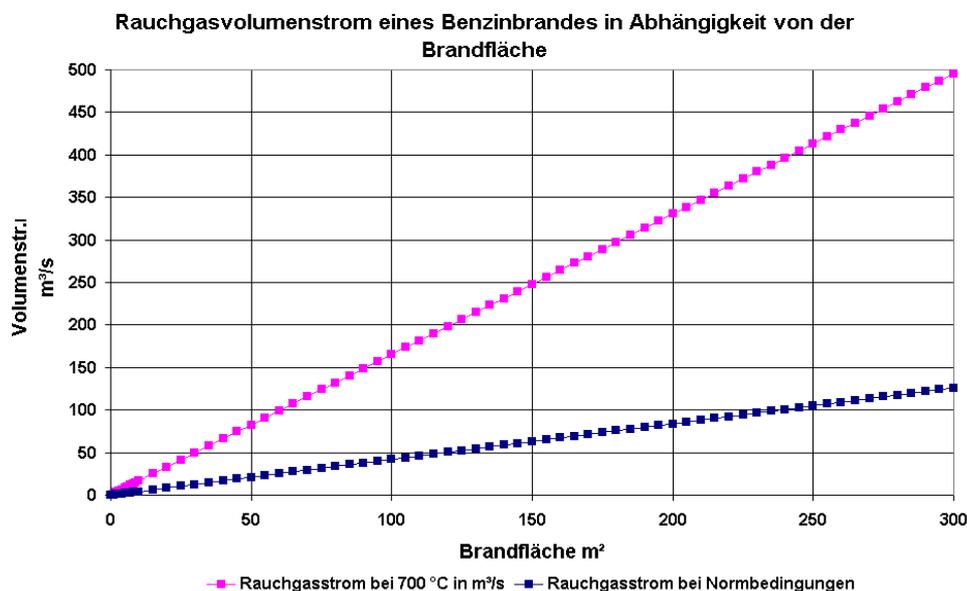


Abbildung 21: Rauchgasvolumenstrom beim Brand von Benzin bei unterschiedlichen Brandflächen

Wenn die Verbrennung mit geringem Luftüberschuss verläuft und eine Rauchgastemperatur bis maximal 700 °C angenommen wird, sollte der grafische Verlauf des tatsächlichen Abgasvolumenstromes zwischen den beiden, in Abbildung 21 dargestellten Kurven liegen. Sowohl die HRR als auch die Abgasvolumina zeigen, dass eine Lache von Benzin oder einer anderen brennbaren Flüssigkeit für die Brandbekämpfung nicht trivial ist. Bei einem Freibrand einer brennbaren Flüssigkeiten auf 300 m² Brandfläche entsprechen die Anforderungen bei der Brandbekämpfung etwa denen beim Brand eines 10 000 m³ Festdachtanks. Für diese Fläche werden für die mobile Brandbekämpfung nach DIN 14494 Löschmittelraten von mindestens 7,4 l/min m² erforderlich, womit dann ca. 3000 l/min an Löschmittel (unverschäumte Schaummittellösung) gebraucht werden.

3.2 Explosionen durch Gasfreisetzung oder Dampfbildung

3.2.1 BLEVE und VCE – Explosion

Explosionen in Gaswolken (BLEVE) ereignen sich nur dann, wenn ein normalerweise unter Druck stehendes flüssiges Gas durch ein Leck oder durch die Zerstörung des Behälters schlagartig entspannt wird. Der plötzliche Druckverlust führt dazu, dass das flüssige Gas, welches unter Normaldruck bei erheblich niedrigerer Temperatur als die Umgebungstemperatur siedet, schlagartig verdampft (Flashverdampfung). Dabei kühlt es sich ab und erreicht bei seiner Siedetemperatur die normale Verdampfungsrate. Der Anteil der Flash-Verdampfung eines Flüssiggases bei Entspannung wird durch folgende Gleichung (8) beschrieben [Schenk 1987].

$$m_D = m_{Fl} \left(1 - e^{-\frac{c_p}{\Delta H_V} (T_U - T_{Sdp})} \right) \quad (8)$$

Bei einem Temperaturunterschied von etwa 50 bis 60 °C kann man annehmen, dass die Flash-Verdampfung 30 bis 50 % der freigesetzten Masse der Flüssigkeit ausmacht. Damit steht bei einem BLEVE unmittelbar nach Entspannung des verflüssigten Gases ausreichend Gas (Dampf) zur Verfügung, um nach Mischung mit Luft und nachträglicher Zündung zu explodieren. Die Flash-Verdampfung ist unmittelbar an die Entspannung des Flüssiggases gebunden und liefert schnell (in wenigen Sekunden) ausreichende Mengen an brennbarem Gas, das sich im Luftstrom eines Tunnels mit der Luft vermischt.

Die Zündung mit nachfolgender Explosion kann verzögert stattfinden, je nach Ort der Zündquelle im Tunnel. Da jedoch durch die Verbrennungsmotoren der Fahrzeuge ausreichend Zündquellen im Tunnel vorhanden sind, ist eine Explosion vorprogrammiert. Je größer der Zeitabschnitt zwischen Freisetzung und Zündung bei einer großen Gasmenge ist, desto heftiger fällt die Explosion aus.

Die Dampfwolken-Explosion (VCE) tritt nach der Verdampfung einer ausreichenden Menge an Flüssigkeitsdampf in einem begrenzten Raum statt. Auf Grund der Tatsache, dass Flüssigkeiten normalerweise einen Siedepunkt oberhalb der Umgebungstemperatur besitzen, wird nur eine begrenzte Menge an Flüssigkeitsdampf gebildet, die vom jeweiligen Dampfdruck der Flüssigkeit abhängig ist. Wenn die Dampfmenge über der Flüssigkeit in der Lage ist, ein explosives Gemisch zu bilden, können diese Gemische explodieren. Somit sind nur solche Flüssigkeiten durch Dampfbildung explosibel, deren Flammpunkt unterhalb der Umgebungstemperatur liegt. Es gilt, je niedriger der Flammpunkt, umso höher der Dampfdruck bei Umgebungstemperatur und umso schneller und sicherer wird örtlich begrenzt die explosive Konzentration für das Dampf-Luftgemisch erreicht. Der Zusammenhang zwischen Dampfdruck und der Umgebungstemperatur wird durch die Gleichung (9) von Clausius-Clapeyron wiedergegeben.

$$\ln \frac{p_U}{p_{Sdp}} = \frac{\Delta H_V}{R} \left(\frac{1}{T_{Sdp}} - \frac{1}{T_U} \right) \quad (9)$$

Für sehr viele organische Substanzen ist die Verdampfungsenthalpie proportional zum Siedepunkt bei Normaldruck und erreicht einen Wert von etwa 85 J/K mol (Troutonsche Regel). Von dieser Regel weichen nur stark polare Flüssigkeiten wie Wasser deutlich ab. Für den Dampfdruck gibt es Temperatur-Dampfdrucktabellen. Der Massenstrom der Verdampfung kann für eine Lache definierter Größe nach folgender Gleichung (10) bestimmt werden:

$$m_{ver}^* = -0,024 \frac{v_W \cdot M \cdot A_{La}}{r_{La} \cdot (273,15 + \vartheta_{La})} \cdot \ln \left(1 - \frac{p_{La}}{1,013215} \right) \quad (10)$$

Ändern sich die Temperaturen oder die Lachefläche wird sich der Massenstrom ebenfalls ändern. Allgemein gilt, dass je näher sich die Lachentemperatur am Siedepunkt der Flüssigkeit befindet, die Verdampfung umso schneller erfolgen wird. Da in einem Tunnel immer Öffnungen vorhanden sind und sich eine Luftströmung einstellt, werden die Explosionsgrenzen des Gemisches erst nach längerer Zeit erreicht und die Explosion selbst nach der Zündung nicht die Stärke einer verdämmten Explosion erreichen. Wichtig bleibt jedoch, dass ein Unfall mit freigesetzter brennbarer Flüssigkeit zu einer Explosion führen kann. Messungen der Gaskonzentration in der abströmenden Luft hinter dem Unfallbereich sind unerlässlich und mit der erforderlichen Vorsicht vorzunehmen.

3.2.2 Gefahren durch Gaswolkenexplosionen

Als wesentlichste Auswirkung einer Gaswolkenexplosion muss der entstehende Druck angesehen werden. Zur Ermittlung des Druckes wird nur ein Teil der in der Gaswolke gespeicherten Verbrennungsenthalpie berücksichtigt. Dieser Energieanteil wird auf eine äquivalente Menge TNT-Sprengstoff umgerechnet und lässt dann Rückschlüsse auf Überdrücke in Abhängigkeit vom Explosionszentrum zu, da diese für TNT bekannt sind. Das TNT-Äquivalent einer unverdämmten Kohlenwasserstoff-Dampf Wolke wird mittels Gleichung (11) abgeschätzt [Koinig 1999].

$$TNT_{\ddot{a}q} = \frac{a \cdot \Delta H_{H,HC} \cdot m_{HC}}{\Delta H_{H,TNT}} \quad (11)$$

Der Spitzenüberdruck der Gaswolkenexplosion im Freien in Abhängigkeit von einem skalierten Abstand z vom Zentrum nach Gleichung (12) mit der Dimension $(m/kg)^{1/3}$ kann schließlich aus dem Diagramm in Abbildung 22 entnommen werden.

$$z = \left(\frac{r}{TNT_{\ddot{a}q}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

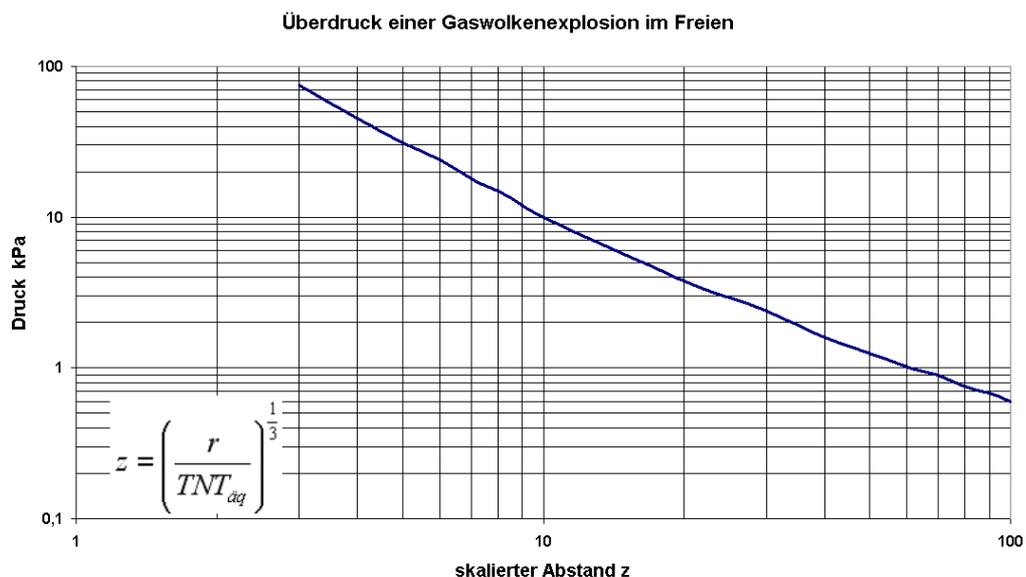


Abbildung 22: Überdruck in Abhängigkeit vom Zentrum bei Gaswolkenexplosionen im Freien

Natürlich entwickeln verdämmte Gaswolkenexplosionen, wie sie in der Regel in Tunneln zu erwarten sind, noch höhere Überdrücke. Aber bereits bei diesem einfachen Modell für ein Ereignis im Freien wird klar, dass Explosionen für Personen höchste Gefahren in sich bergen. In Tabelle 24 sind die Wirkungen von Überdrücken auf Menschen aufgelistet [Koinig 1999].

Tabelle 24: Auswirkung der Überdrücke von Explosionen auf Menschen

| Überdruck | | Auswirkungen auf Menschen |
|-------------|-------|--|
| [bar] | [kPa] | |
| 0,006 | 0,6 | Orkan mit Windstärke 12 |
| 0,01 | 1 | Windstoss (150 km/h) reißt stehende Person um |
| 0,03 | 3 | Leichte Verletzungen durch Glassplitter möglich |
| 0,07 | 7 | Keine Verletzungen im offenen Gelände |
| 0,08 - 0,09 | 8 – 9 | Windstoss (360 km/h) reißt liegende Person mit |
| 0,17 | 17 | 1% Trommelfellriss |
| 0,19 | 19 | 10% Trommelfellriss |
| 0,21 | 21 | 10% Tote und Verletzte im Freien |
| 0,30 | 30 | Tote und Verletzte innerhalb von Bauten durch Einsturz |
| 0,34 | 34 | 25% Tote und Verletzte im Freien |
| 0,44 | 44 | 50% Trommelfellriss |
| 0,48 | 48 | 70% Tote und Verletzte im Freien |
| 0,84 | 84 | 90% Trommelfellriss |
| 1,0 | 100 | 95% Tote und Verletzte im Freien, 1% Lungenriss |
| 2,0 | 200 | 99% Lungenriss |

Die in Tabelle 24 aufgeführten Wirkungen machen deutlich, dass eine Gaswolken-Explosion im Tunnel für alle darin befindlichen Personen ernste Gefahren hinsichtlich des Auftretens von schweren bis tödlichen Verletzungen in sich birgt.

Eine Explosion dauert maximal Bruchteile einer Sekunde. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten vorgemischter explosibler Gemische von Kohlenwasserstoffen mit Luft betragen etwa 160 m/s. Personen, die sich im Tunnel befinden, würden durch die sich nach beiden Seiten gerichtet ausbreitende Druckwelle erfasst und geschädigt. Weiterhin wird durch die Explosion schlagartig eine große Energiemenge freigesetzt, die sich durch Wärmestrahlung und durch Konvektion ausbreitet. Um den Durchmesser eines Feuerballes im Freien abschätzen zu können, wurden Unfalldaten analysiert und empirische Korrelationen aufgestellt. Von TNO (Institute of Environmental and Energy Technology, Apeldoorn, Niederlande) wurde eine Korrelation (Gleichung 13) zwischen dem Durchmesser des Feuerballes und der Masse des reagierenden Stoffes abgeleitet [Koinig 1999].

$$d_{Fb} = 6,48 \cdot m_{Brd}^{0,325} \quad (13)$$

Für die Lebensdauer des Feuerballes wurde von TNO folgende Beziehung (14) hergeleitet.

$$D_{Fb} = 0,852 \cdot m_{Brd}^{0,26} \quad (14)$$

In einem Tunnel wird sich der Feuerball nach beiden Seiten soweit ausdehnen, wie sich das Gas-Luftgemisch ausgebreitet hat. Die Druckwelle wird sich nach beiden Seiten im Tunnel ausbreiten. Erst deutlich später macht sich die thermische Ausdehnung der Gase bemerkbar.

Ein Feuerball mit 150 m Durchmesser, wie 1973 in Kingman (Arizona) mit einer Brennstoffmasse von 16 t Propan/Butan besitzt ein Volumen von ca. $1,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Im Vergleich zu diesem Wert weist der 3,6 km lange Brandleitertunnel bei Oberhof in Thüringen mit einem Tunnelquerschnitt von ca. 50 m^2 ein Gesamtvolumen von $1,8 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ auf. Dieser Eisenbahntunnel wurde gewählt, weil der Tunnelquerschnitt mit normalen Straßentunneln vergleichbar ist. Somit würde die Flammenfront einer Gaswolkenexplosion bei den meisten Tunneln die gesamte Tunnellänge erfassen. Sowohl Temperatur als auch Wärmestrahlung erreichen in derartigen Fällen Werte, die extreme Auswirkungen auf das Leben der involvierten Personen haben würden. Nähere

Bewertungen der Wirkung von Explosionen können mit der Probit-Funktion nach Lee ausgeführt werden. Eine gute Darstellung dieser Methode findet man bei [Kaiser et al. 2000].

Aus der Sicht der Gefahrenabwehr ist einer Explosion kein mobiler Einsatz entgegen zu setzen. Es ist aber zu erwarten, dass eine hohe Anzahl von Personen verletzt wird und die Maßnahmen sich dann auf einen Massenansturm von Verletzten (MANV) konzentrieren müssen.

Im Fall eines nur teilweisen Austrittes von Flüssiggas würde es nach der Gaswolkenexplosion an der Leckagefläche des Transportbehälters zur Ausbildung eines Freistrahls kommen oder es entwickelt sich ein Lachenbrand über der siedenden Flüssigkeit. Sowohl der Freistrahls als auch der Lachenbrand erfordern eine gesonderte Taktik und sollten innerhalb von Räumen oder Umhüllungen nur dann gelöscht werden, wenn das Leck abgedichtet werden kann.

Rechnet man allerdings konservativ, dann würde sich infolge vollständiger Vermischung mit der Tunnelluft eine definierte Konzentration einstellen, die unterhalb einer definierten Freisetzungsrates sehr schnell die untere Zündgrenze unterschreitet und oberhalb einer anderen Freisetzungsrates die obere Zündgrenze überschreitet und damit würden in beiden Fällen die Gas – Luft Gemische nicht mehr zündfähig sein. In Abhängigkeit vom Zündbereich des Gas-Luft-Gemisches lassen sich Freisetzungsrates berechnen, unterhalb bzw. oberhalb derer die Zündgrenzen unter- bzw. überschritten werden. In beiden Fällen wären die Gemische nicht mehr zündfähig. Für eine Freisetzung von Propan (Zündgrenzen 0,9 bis 9 Vol-%) in einem Tunnel mit 50 m² Querschnittsfläche und einer Belüftungsgeschwindigkeit von 1m/s würden sich nicht zündfähige Mischungen unterhalb einer Freisetzungsrates von ca. 1 kg/s und oberhalb einer Freisetzungsrates von ca. 10 kg/s einstellen. Da aber im realen Fall keine vollständige Vermischung stattfindet, verbleiben innerhalb des Tunnels immer nicht definierbare Volumenbereiche mit zündfähigem Gemisch. Diese Teilbereiche dürften ausreichend sein, um erhebliche Schäden zu bewirken.

3.2.3 Einfluss des Zündzeitpunktes

Es wurde bereits darauf verwiesen, dass der Zündzeitpunkt für eine Explosion von Gasen und Dämpfen eine wesentliche Rolle spielt. Bei Freisetzung brennbarer Materialien muss es nicht unbedingt zur Zündung kommen. Die Ursachen können fehlende Zündquellen oder auch eine Unter- bzw. Überschreitung von Zündgrenzen sein. Nach [Persson 2002] wird für ein mögliches Szenario mit verflüssigtem Propangas der Fehlerbaum in Abbildung 23 angegeben.

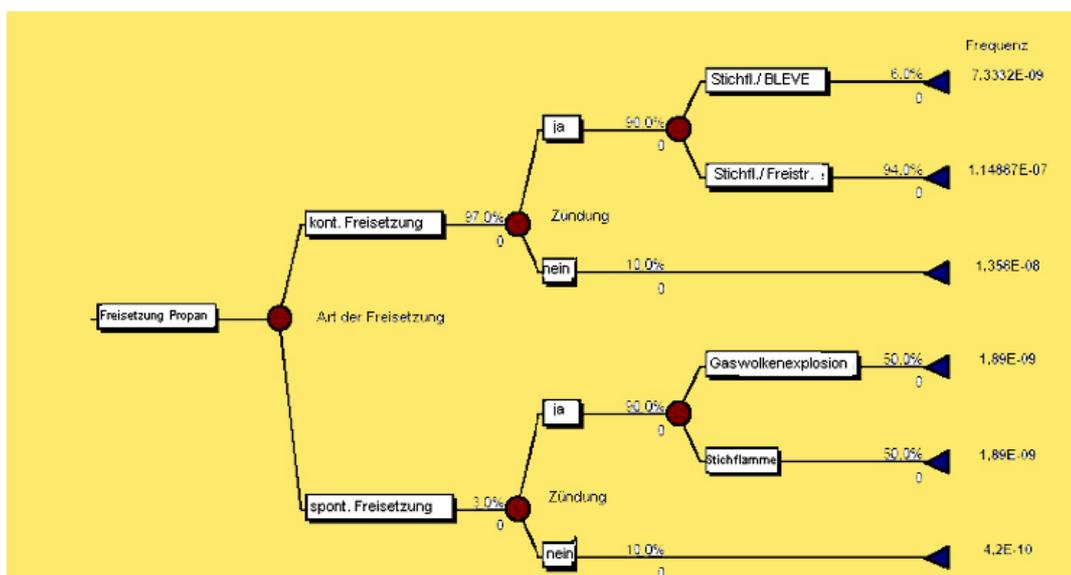


Abbildung 23: Mögliche Ereignisse beim Transport von flüssigem Propan

In diesem Fehlerbaum sind die möglichen Ereignisabläufe bei kontinuierlicher und spontaner Freisetzung dargestellt. Im Fall der kontinuierlichen Freisetzung infolge einer Leckage am Behälter kann

- ◆ nach erfolgter Zündung unmittelbar während des Unfalles eine Stichflamme auftreten, weil das freiwerdende Gas sich noch nicht mit der Luft gemischt hatte und in der Folge kann es dann zu einem BLEVE kommen.
- ◆ nach erfolgter Zündung unmittelbar während des Unfalles eine Stichflamme auftreten, die sich nach Abflammen des bereits ausgetretenen Gases zu einer Freistrahlf Flamme am Leck des Tankbehälters entwickelt.
- ◆ ohne dass eine Zündung erfolgt, die Explosionsgefahr sehr hoch werden und die Möglichkeiten der Gefahrenbeseitigung gering sein.

Im Fall der spontanen Freisetzung des gesamten Tankvolumens ist die Wahrscheinlichkeit der Zündung sehr hoch. Sie kann

- ◆ bei ausreichender Vermischung (zeitlich und mechanisch) zu einer Gaswolkenexplosion führen oder
- ◆ bei sofortiger Zündung zu einer Stichflammenbildung mit nachfolgendem Lachenbrand führen.
- ◆ ohne zu zünden zu großen Volumina explosibler Gemische führen, die nur noch durch Verdünnung bei gleichzeitigem Ausschluss aller Zündquellen beseitigt werden können.

Dieser Fehlerbaum zeigt sehr deutlich, dass bei allen Varianten der Freisetzung von Flüssiggasen außerordentlich hohe Risiken für das Leben von Personen und das Bauwerk selbst auftreten können.

3.3 Freisetzung toxischer Stoffe

3.3.1 Beurteilungswerte toxischer Stoffe

Die Freisetzung toxischer Stoffe bei einem Unfall in einem Tunnel führt vorzugsweise zu ihrer inhalativen Aufnahme durch Personen, die sich im Tunnel befinden. Ein direkter Stoffkontakt über die Haut ist nur in unmittelbarer Nähe des Unfalles möglich. Deshalb sollte man in erster Linie störfallbezogene Beurteilungswerte nutzen, um den Kontakt der Personen mit einer bestimmten Schadstoffkonzentration, für kürzere Zeiten zu beurteilen. Störfallbezogene Beurteilungswerte sind die ERPG-Werte (Emergency Response Planning Guidelines) und AEGL-Werte (Acute Exposure Guideline Levels). Für die Einsatzkräfte der Feuerwehren wurde der ETW-Wert (Einsatztoleranzwert) definiert. Für diese Werte sind in Tabelle 25 die dazugehörigen Definitionen dargestellt.

Bei der Freisetzung eines toxischen Stoffes in einem Tunnel wird der Schadstoff zwar auch in die vorherrschende Luftströmung entlassen, doch kann er sich nur innerhalb des verfügbaren Volumens mischen. So tritt bei einer spontanen Freisetzung ein Maximalwert auf, der nur kurzzeitig wirksam wird. Bei einer kontinuierlichen Freisetzung wird in der vorherrschenden Strömung ein Konzentrationswert erreicht, der über den Zeitraum der Freisetzung im Wesentlichen erhalten bleibt. Die toxische Wirkung verschiedener Stoffe ist unterschiedlich, so dass für jeden toxischen Stoff eigene Grenzwerte gelten.

Da die kritischen Konzentrationen toxischer Stoffe sehr gering sind, in der Regel 1 bis etwa 1000 ppm, kann die Freisetzung eines solchen Schadstoffes im Tunnel sehr schnell zu kritischen Werten führen. So kann beispielsweise die kontinuierliche Freisetzung von Chlorgas, welches sich im Verlauf der Strömung vollständig mit der Luft vermischen kann, bereits bei einer Freisetzungsrate von 1 kg/s in einem Tunnel mit 50 m² Querschnittsfläche und einer Luftströmung von 1 m/s den AEGL 3 Grenzwert, der für eine Expositionsdauer von 10 min gilt, um rund 24 % übersteigen. An diesem Beispiel wird deutlich, dass Freisetzungen von Gefahrgütern,

insbesondere gasförmiger, zu hohen Risiken für im Tunnel befindliche Personen führen werden. Im Bereich der abströmenden Luft sind Verletzte und/oder fluchtunfähige Personen zu erwarten.

Andere Schadstoffe, die normalerweise flüssig sind, benötigen für ihre Verdunstung entsprechende Zeiten. Es kann mit Gleichung (10) der Massestrom der Verdunstung berechnet werden und damit die erreichbare Konzentration in der Luftströmung innerhalb des Tunnels bei vollständiger Vermischung bestimmt werden. Auch bei diesen Stoffen werden sehr schnell gefährliche Situationen erreicht, infolge der innerhalb des ppm – Bereiches liegenden Konzentrationen für das Erreichen der Grenzwerte. Die Tunnelbelüftung reicht nur bei kleinen kontinuierlichen Freisetzungsraten aus, um die Stoffkonzentrationen so zu verdünnen, dass sie die Grenzwerte deutlich unterschreiten. Es ist aber nicht möglich, mit der maximalen Steigerung der Luftgeschwindigkeit um den Faktor 3 bis 4 bei hohen Freisetzungsraten Erfolge zu erzielen. Im Fall des Austritts flüssiger Schadstoffe wird die Verdunstung durch Erhöhung der Luftgeschwindigkeit sogar gesteigert.

Tabelle 25: Störfallbezogene Beurteilungswerte [TLUG 2006]

| Beurteilungswert | Definition |
|------------------|--|
| ERPG 1 | ist die maximale luftgetragene Konzentration eines Schadstoffes, bei der unterhalb dieses Wertes sämtliche Personen bis zu einer Stunde exponiert werden können, ohne dass sie unter mehr als leichten, vorübergehend nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen leiden bzw. ohne dass sie einen eindeutig definierten unangenehmen Geruch wahrnehmen. |
| ERPG 2 | ist die maximale luftgetragene Konzentration eines Schadstoffes bei der davon ausgegangen wird, dass unterhalb dieses Wertes nahezu sämtliche Personen bis zu einer Stunde exponiert werden können, ohne dass sie unter irreversiblen oder sonstigen schwerwiegenden gesundheitlichen Auswirkungen oder Symptomen leiden bzw. solche entwickeln, welche die Fähigkeit einer Person beeinträchtigen könnten, Schutzmaßnahmen zu ergreifen. |
| ERPG 3 | ist die maximale luftgetragene Konzentration eines Schadstoffes bei der davon ausgegangen wird, dass unterhalb dieses Wertes sämtliche Personen bis zu einer Stunde exponiert werden können, ohne dass sie unter lebensbedrohlichen gesundheitlichen Auswirkungen leiden bzw. solche entwickeln. |
| AEGL 1 | ist die luftgetragene Schadstoffkonzentration (in ppm oder mg/m ³) ab der die allgemeine Bevölkerung, inklusive empfindlicher aber exklusive hyperempfindlicher Individuen, spürbares Unwohlsein erleiden können. Luftgetragene Schadstoffkonzentrationen unterhalb des AEGL 1 Wertes repräsentieren Expositionsschwellen, die leichte Geruchs-, Geschmacks- oder andere sensorische Reizungen hervorrufen können. |
| AEGL 2 | ist die luftgetragene Schadstoffkonzentration (in ppm oder mg/m ³) ab der die allgemeine Bevölkerung, inklusive empfindlicher aber exklusive hyperempfindlicher Individuen, irreversible oder andere schwerwiegende langandauernde Schädigungen oder eingeschränkte Fluchtmöglichkeiten erleiden können. Luftgetragene Schadstoffkonzentrationen unterhalb des AEGL 2 Wertes aber oberhalb des AEGL 1 Wertes repräsentieren Expositionsschwellen, die spürbares Unwohlsein hervorrufen. |
| AEGL 3 | ist die luftgetragene Schadstoffkonzentration (in ppm oder mg/m ³) ab der die allgemeine Bevölkerung, inklusive empfindlicher aber exklusive hyperempfindlicher Individuen, lebensbedrohliche Schädigungen oder Tod erleiden können. Luftgetragene Schadstoffkonzentrationen unterhalb des AEGL 3 Wertes aber oberhalb des AEGL 2 Wertes repräsentieren Expositionsschwellen, die irreversible oder andere schwerwiegende langandauernde Schädigungen oder eingeschränkte Fluchtmöglichkeiten hervorrufen können |
| ETW | ist die Konzentration eines Schadstoffes, oberhalb derer die Einsatzmaßnahmen grundsätzlich unter Atemschutz auszuführen sind. Unterhalb dieser Konzentration kann ohne Atemschutz gearbeitet werden, soweit nicht aus anderen Gründen Schutzmaßnahmen angezeigt sind (z. B. vermutete oder nicht messbare Stoffe) |

Bei schlagartigen Freisetzungen wird grundsätzlich eine vollständige Zerstörung des Transportbehälters angenommen. In diesen Fällen wird die gesamte Masse des toxischen Stoffes auf ein Mal freigegeben. Es wird je nach Eigenschaft des Stoffes (gasförmig, flüssig) eine zeitlich abhängige Konzentrationsspitze im Luftstrom geben, die dann aber örtlich schnell geringer wird. Dieser Peak im Konzentrationsverlauf kann bereits bei Freisetzung einer gasförmigen Stoffmasse von 10 kg so hohe Werte erreichen, dass im Abstrombereich befindliche Personen getötet werden. Für die Sicherheit der Einsatzkräfte gilt, dass bei Freisetzungen grundsätzlich zunächst Atemschutz und unmittelbar vor Ort auch Chemikalienschutz-ausrüstung getragen wird. Erst nach Erhalt von Messwerten können die Schutzmaßnahmen gegebenenfalls gelockert werden.

Wenn bei brennenden toxischen Stoffen keine sofortige Entsorgung des nach dem Löschen verbleibenden Stoffes möglich ist, ist es besser, diesen kontrolliert abbrennen zu lassen.

4 Beeinflussung der Gefährdungsszenarien durch technische Maßnahmen

4.1 Lüftung und Verbrennung

4.1.1 Grundsätzliche Aussagen

Wie bereits dargelegt, dient die Belüftung der Tunnel im Fall eines Ereignisses vorzugsweise dazu, den darin befindlichen Personen die Selbstrettung aus dem gefährdeten Bereich zu ermöglichen und das Tunnelbauwerk vor mechanischer und thermischer Belastung zu schützen. Hinsichtlich der Einflüsse auf das eigentliche Ereignisszenario gibt es unterschiedliche Einschätzungen. Die Steigerung der Verbrennung infolge starker Belüftung wird in der Literatur umfassend diskutiert. Eine Zunahme der HRR besitzt vor allem bei Lachenbränden und bei der Bildung explosibler und toxischer Gase in Tunneln eine besondere Bedeutung. Für die Untersuchung dieser Einflüsse wurden gesonderte Versuche ausgeführt, die auch für die Bewertung der HRR von Pkw-Bränden Bedeutung haben. Das ist deshalb notwendig, weil die Mehrzahl der Untersuchungen von Pkw-Bränden mit leeren oder halb gefüllten Tanks ausgeführt wurden und damit auf die Ausbildung von Benzinlachen nur wenig geachtet wurde. Gleiche Aussagen treffen für HGV zu, bei denen die oft außen liegenden Tanks in der Mehrzahl Kunststofftanks sind.

4.1.2 Ergebnisse der Literatur

Die wesentlichen Aussagen werden von [Carvel 2004] gemacht, der auf der Grundlage von Forschungsergebnissen mit Hilfe statistischer Methoden die Steigerung der Intensität von Bränden in Tunneln in Abhängigkeit von der Belüftung abschätzte. Seinen Abschätzungen für den Brand eines HGV in einem Tunnel mit etwa 7,6 m Breite zufolge wird erwartet, dass die HRR bei einem erzwungenen Luftstrom mit der Geschwindigkeit von

- ◆ 2 m/s um den Faktor 4 in der Entwicklungsphase und um den Faktor 2 in der Vollbrandphase,
- ◆ 4 m/s um den Faktor 5 bis 6,
- ◆ 6 m/s um den Faktor 7 bis 8 und
- ◆ 10 m/s um den Faktor 9 bis 10 ansteigt.

Es wurde bereits erwähnt, dass die Längslüftung allgemein eine steigernde Wirkung auf Poolbrände in Tunneln hat. Für große Poolbrände in zweispurigen Tunneln mit etwa 10 m Breite wird von [Carvel 2004] erwartet, dass die HRR bei einem erzwungenen Luftstrom mit einer Geschwindigkeit

- ◆ zwischen 2 m/s und 4 m/s um etwa 30%,
- ◆ von 6 m/s um etwa 50% und
- ◆ von 10 m/s um etwa 70% gesteigert wird.

Für mittlere Poolfeuer in Tunneln dagegen wird von [Carvel 2004] eingeschätzt, dass die längsverlaufende Belüftung eine verringemde Wirkung auf die HRR hat. Für solche Brände in zweispurigen Tunneln mit ungefähr 10 m Breite wird erwartet, dass die HRR bei einem erzwungenen Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von

- ◆ 2 m/s um etwa 15%,
- ◆ 4m/s um etwa 30%,
- ◆ 6m/s um etwa 40% und
- ◆ 10 m/s um etwa 50% gemindert wird.

Jedoch ist laut [Carvel 2004] zu beachten, dass diese Ergebnisse von den verwendeten Brandstoffen abhängig sind. Bei Methanol beispielsweise wurde ein Ansteigen der HRR auch bei mittleren Poolflächen beobachtet.

Für kleine Poolbrände in Tunneln wird vom Autor prognostiziert, dass die längsverlaufende Belüftung eine leicht zunehmende Wirkung auf die HRR hat, wenn die Belüftungsgeschwindigkeiten niedrig sind (unterhalb 5 m/s). Bei höheren Geschwindigkeiten der Belüftung kann dagegen wieder eine leicht abnehmende Wirkung auf die HRR erfolgen. Für kleine Poolbrände in zweispurigen Tunneln mit etwa 10 m Breite wird erwartet, dass die HRR bei einem erzwungenen Luftstrom mit einer Geschwindigkeit von

- ◆ 2 m/s um etwa 15% und
- ◆ 4 m/s um etwa 10% ansteigt, dagegen bei
- ◆ 6 m/s um einen kleinen Betrag und
- ◆ 10 m/s um etwa 10% sinkt.

[Blinov und Khudiakov 1957] wiesen bereits nach, dass für Poolbrände zwei Grundregimes möglich sind. Bei großen Durchmessern wird der Brand durch die Strahlung dominiert (radiativ) während bei kleinen Durchmessern der konvektive Anteil bestimmend wird. Darüber hinaus kann im konvektiven Regime die Strömung laminar oder turbulent sein, während im strahlungsdominierten Regime die Flammen optisch dünn oder dick sein können. Diese Unterscheidungen können im einfachsten Fall als Funktion des Pooldurchmessers abgeleitet werden (Tabelle 26).

Tabelle 26: Verbrennungstypen bei verschiedenen Pooldurchmessern

| Durchmesser m | Verbrennungstyp |
|---------------|------------------------|
| < 0,05 | konvektiv, laminar |
| 0,05 bis 0,2 | konvektiv, turbulent |
| 0,2 bis 1,0 | radiativ, optisch dünn |
| > 1,0 | radiativ, optisch dick |

Die Werte in Tabelle 23 zeigen, dass bereits ab einem Pooldurchmesser von 0,2 m die Strahlung der dominierende Faktor für einen Poolbrand wird und bei Pooldurchmessern >1 m mit einer ausgeprägten Flammenstrahlung zu rechnen ist.

[Babrauskas 1977] beschreibt Versuche zur Bestimmung der Verbrennungsgeschwindigkeit eines Hexanpools mit einem Durchmesser von 4 Metern. Bei Windunterstützung verdoppelte sich die Verbrennungsgeschwindigkeit. Er gibt eine Gleichung (15) an, die von Blinov und Khudyakov stammt und die beste verfügbare Formel für die Berechnung der Verbrennungsgeschwindigkeit

zu sein scheint, allerdings mit der Einschränkung, dass sie nicht für Alkohole und nicht für Windgeschwindigkeiten geeignet ist, die ausreichend sind, die Flammen auszublasen.

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_0} = 1 + 0,15 \frac{u}{D} \quad (15)$$

So berichtet [Babrauskas 1976] von Untersuchungen der Wirkung von Wind auf Poolbrände (JP-5 als Brandstoff) mit einem Durchmesser von 1 und 3 m. Dabei fällt die Abbrandrate eines Poolbrandes von 1 m Durchmesser bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s auf etwa 50% seines Wertes in ruhiger Luft. Damit ist diese Windgeschwindigkeit bereits nahe am Ausblasen der Flamme zu sehen.

Bei Poolbränden mit großem Durchmesser gibt es immer eine steigende Wirkung durch konvektive Wärmeübertragung, außerdem erscheinen auch zwei weitere Phänomene. Die Flammentemperatur steigt aufgrund besserer Mischung und Verbrennung an, und der Strahlungsfluss ist umverteilt. Es scheint so, als ob der Wind das Flammenvolumen verkleinert und dadurch die Wärmestrahlung sinkt .

Nach [Steinhaus et al. 2007] sind die Wirkungen des Windes auf einen Poolbrand komplex. Je nachdem wie groß die Windgeschwindigkeit ist, kann es eine Wirkung durch konvektive Verbesserungen geben. Die Belüftung kann auch das Mischen der Komponenten verbessern und eine effizientere Verbrennung mit Zunahme der Flammentemperatur bewirken. Weiterhin wird der Heißgasstrom (Plume) verschoben, wodurch eine bedeutsame Änderung des Strahlungsprofils und damit der Verdampfungsgeschwindigkeit des Treibstoffs erfolgt. Mehrere Studien zeigen die Zunahme des Brenntempos großer Pools im Freien durch Wind. Der Einfluss der Belüftung ist noch komplizierter, wenn der Brand auf einen Raum, Korridor oder Tunnel beschränkt wird. Unter diesen Umständen kann ein Poolbrand besonders gut belüftet sein und das Brenntempo deshalb sehr gesteigert. Dies ist bei Tunnelfeuern am Beginn erzwungener Belüftung besonders verbreitet. Die Kombination der Belüftung mit einer einschränkenden Geometrie tendiert dazu, eine viel größere Ablenkung der Flammen aus einem Poolfeuer zu generieren, als es die Belüftung allein tun wird.

Insgesamt wird deutlich, dass die Verhältnisse bei Poolbränden sehr komplex sind. Es ist aber zu erkennen, dass große Poolbrände in begrenzten Räumen bei Belüftung zu gesteigerter HRR tendieren.

4.2 Brandausbreitung über die Schlitzrinne

Für das Ableiten der Fahrbahnwässer, insbesondere im Hinblick auf ausfließende brennbare Flüssigkeiten, ist in Tunneln eine Schlitzrinne für eine Abflussmenge von 100 l/s vorzusehen. Sie ist in Abschnitten von maximal 50 m abzuschotten und jeweils mit einem Siphon zu versehen [RABT 2006]. Diese bauliche Maßnahme kann zur Brandausbreitung beitragen.

Eigene Versuche mit einer Schlitzrinne, deren Schlitzbreite 50 mm betrug, zeigten, dass einfließende brennbare Flüssigkeit innerhalb der Abflussrinne gezündet wird und die Flamme in der Abflussrinne 1 bis 1,5 m über den Schlitz hinaus reicht. Allerdings ist die in der Schlitzrinne vorhandene Luft örtlich nicht ausreichend für einen Brand über der gesamten Flüssigkeitsoberfläche, so dass die Flamme in der Abflussrinne wandert und je nach Sauerstoffangebot an verschiedenen Stellen des Schlitzes erscheint, wie die Bildfolge in Abbildung 24 zeigt. Somit kann über eine Schlitzrinne die Brandausbreitung bis zum nächsten Siphon erfolgen. Die aus der Schlitzrinne in den freien Raum gehenden Flammen sind geeignet, um brennbare Materialien z. B. stehende Fahrzeuge zu zünden.

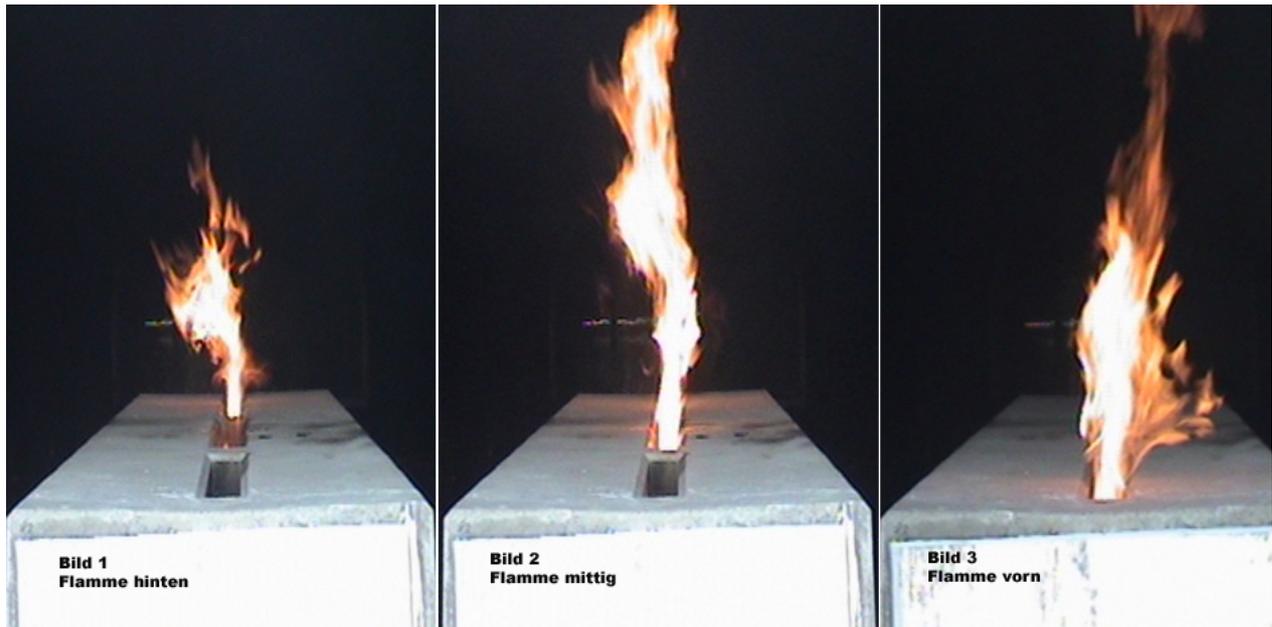


Abbildung 24: wandernde Flammen in einer Schlitzrinne

4.3 Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe

Die Brandbekämpfung in Tunneln ist ausgerichtet auf das Löschmittel Wasser mit seinen verschiedenen Anwendungsvarianten. Entsprechend [RABT 2006] stehen in Straßentunneln maximal 1200 l/min an Löschwasser für eine Stunde zur Verfügung. Für die Anwendung von Schäumen als Löschmittel muss der Schaummittelvorrat der Brandstelle mobil zugeführt werden. Der Löschmittelvorrat ist sowohl für den Schutz von Einsatzkräften und Einsatztechnik vor Strahlungsexposition als auch für das Löschen der Brände vorgesehen. Grundsätzlich muss davon ausgegangen werden, dass in der Anfangsphase der Brandbekämpfung eines entwickelten Brandes etwa 10 Minuten nach der Zündung die Wärmestrahlung luvseitig ihren maximalen Wert erreicht hat. Im Leebereich wird die Ausbreitung der Wärmestrahlung durch Absorption an festen Bestandteilen (Ruß und Flugaschen) behindert. Die Einsatzkräfte können sich mit normaler Schutzbekleidung dem Brandherd nur bis auf etwa 20 m nähern. Ein Agieren in kürzerer Distanz zum Brandherd erfordert einen effizienten Schutz vor Wärmestrahlung. Im begrenzten Volumen eines Tunnels kann in Richtung des Brandherdes versprühtes Löschwasser, welches den gesamten Querschnitt des Tunnels ausfüllt, die Wärmestrahlung absorbieren. Für die Strahlungsabsorption muss allerdings ein ausreichender Volumenstrom an Wasser zur Verfügung stehen. Dieser Volumenstrom beträgt mindestens $\frac{1}{4}$ des verfügbaren Gesamtvolumenstroms an Löschwasser. Damit verbleiben etwa 900 l/min Löschwasserstrom zur Brandbekämpfung.

Durch [Kohl und Pleß 2007] wurden im Rahmen einer Literaturstudie die Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschantensität von Löschwasser untersucht. Berücksichtigt wurde die wichtigsten international verfügbaren Veröffentlichungen über die Löschwasserströme bei der Bekämpfung von Bränden fester Stoffe. Es wurde festgestellt, dass es gegenwärtig kein mathematisches Modell gibt, welches die Kopplung des Brandprozesses und des Löschens mit Wasser ausreichend beschreiben kann. Die in der Literatur verfügbaren Ansätze zur Abschätzung von Löschantensitäten beruhen auf empirischen Werten, die aus der Auswertung von Einsatzstatistiken abgeleitet wurden. Die wichtigsten Ansätze wurden bereits von [Kohl et al. 2005] zusammengefasst. Auf das Ergebnis wird später noch eingegangen. Offen bleiben vor allem die taktischen Probleme des Löschens unter den Brandbedingungen in einem Tunnel.

4.3.1 Ergebnisse der Untersuchungen an festen Stoffen (Brandklasse A)

Brandobjekte der Brandklasse A besitzen immer eine dreidimensionale Struktur. Die Oberflächen der Brandstoffe nehmen im Raum die unterschiedlichsten Positionen ein und an ihren Oberflächen können direkte Kontakte mit heißen Rauchgasen auftreten. Zur Energieübertragung durch Strahlung kommt es zusätzlich auch zur Energieübertragung durch Konvektion. Die Folge davon ist eine deutlich gesteigerte Brandausbreitung. Die nachfolgende Darstellung einer Brandausbreitung (Abbildung 25) wurde mit einer einfachen Versuchsanordnung gewonnen. Im Versuch wurden zwei Stapel Pappkartons nebeneinander aufgestellt. Der Abstand zwischen den Stapeln betrug etwa 0,1 m. Die Stapel wurden im Bodenbereich mittels einer Lache aus 10 ml Benzin gezündet. Der Verlauf der Brandausbreitung zwischen beiden Stapeln wurde gefilmt. So konnte für jede dargestellte Zeit ein entsprechendes Bild aus dem Video ausgewählt und auf der Zeitachse nebeneinander angeordnet werden.

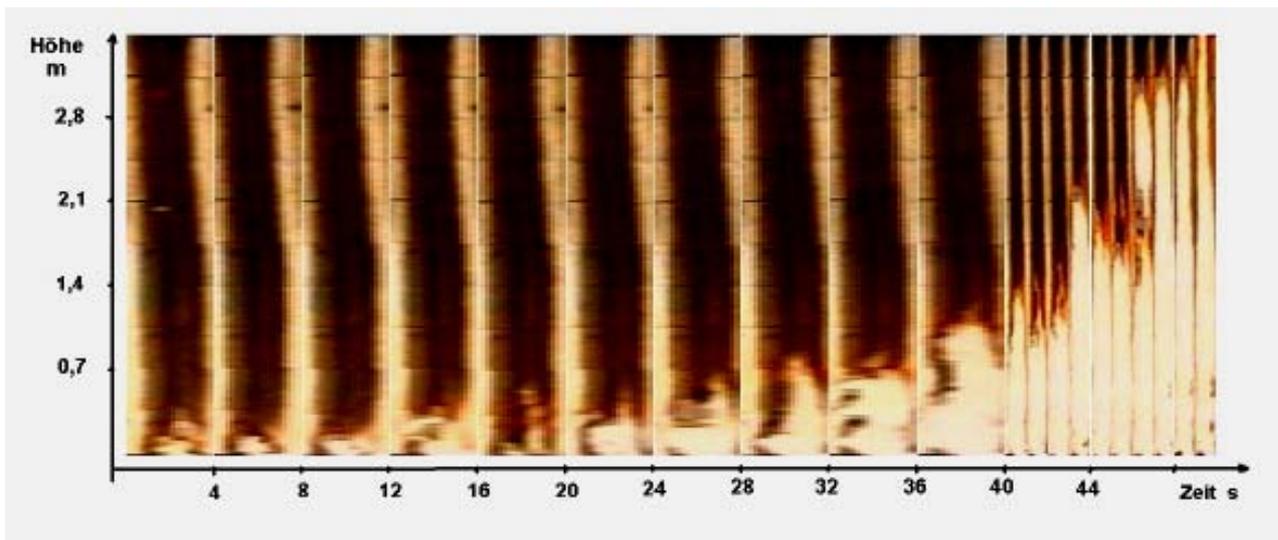


Abbildung 25: zeitliche Bildfolge der Brandausbreitung in einem Spalt von gestapelten Kartons

Es ist sehr deutlich der exponentielle Verlauf der Flammenausbreitung im Spalt zu erkennen. In gleicher Weise kann die Brandausbreitung bei dreidimensionalen Objekten, beeinflusst durch innere Hohlräume (z.B. Abdeckungen aller Art, Rückstrahlung von Wänden usw.), vonstatten gehen.

Ebenso wie bei der Brandausbreitung an räumlichen Objekten die geometrischen Faktoren berücksichtigt werden müssen, wird auch der Löschvorgang durch die Geometrie beeinflusst. Das Aufbringen des Löschwassers an der Oberfläche der Brandstoffe dient dabei vorrangig der Kühlung dieser Flächen und damit der Aufnahme von Energie aus dem Oberflächenbereich des brennbaren Stoffes, so dass die Pyrolyse- und Verdampfungsprozesse im brennbaren Stoff vermindert oder vollständig verhindert werden. Der Kontakt zwischen den Wassertropfen und den verschiedenen angeordneten Brandstoffoberflächen unterscheidet sich je nach Lage der Fläche. Da auch die umgebende Luft einen deutlichen Einfluss auf die Wassertropfen ausüben kann, muss diese insbesondere bei Spalten und engen Räumen mit berücksichtigt werden. Im Ergebnis dieser Überlegungen ist festzustellen, dass offensichtlich nur solche Oberflächen, die vom Standort des Feuerwehrmannes sicher erreicht werden können, auch mit der verfügbaren Löschintensität gelöscht werden können. Um diese Aussagen zu belegen, wurde zunächst das Verhalten von Sprühstrahlen im Bereich von Kanälen untersucht. Zielstellung war dabei, die Wirksamkeit der Strahlen in den mit Luft gefüllten Spalten festzustellen. Es wurde jeweils nur der Wasserstrom gemessen, welcher sich entsprechend der Eintrittsfläche des Kanals an den Kanalwänden hätte niederschlagen müssen. Es wurden in den Versuchen zwei Varianten des Eindringens des Wassers gegenübergestellt. Die Düsenanordnung über der Oberfläche des Materials, bei der das Eindringen der Wassertropfen von oben in den Kanal erfolgt, entspricht der Anordnung einer stationären Löschanlage. Bei der seitlichen Anordnung der Düse wird das Wasser wie bei der mobilen Brandbekämpfung aufgegeben. Der induzierte Luftstrom innerhalb

des Kanals sollte den Auftrieb der heißen Rauchgase während des Brandes darstellen. Der prozentuale Anteil des Wasserstroms, der in den Kanal gelangt, ist in der Abbildung 26 dargestellt.

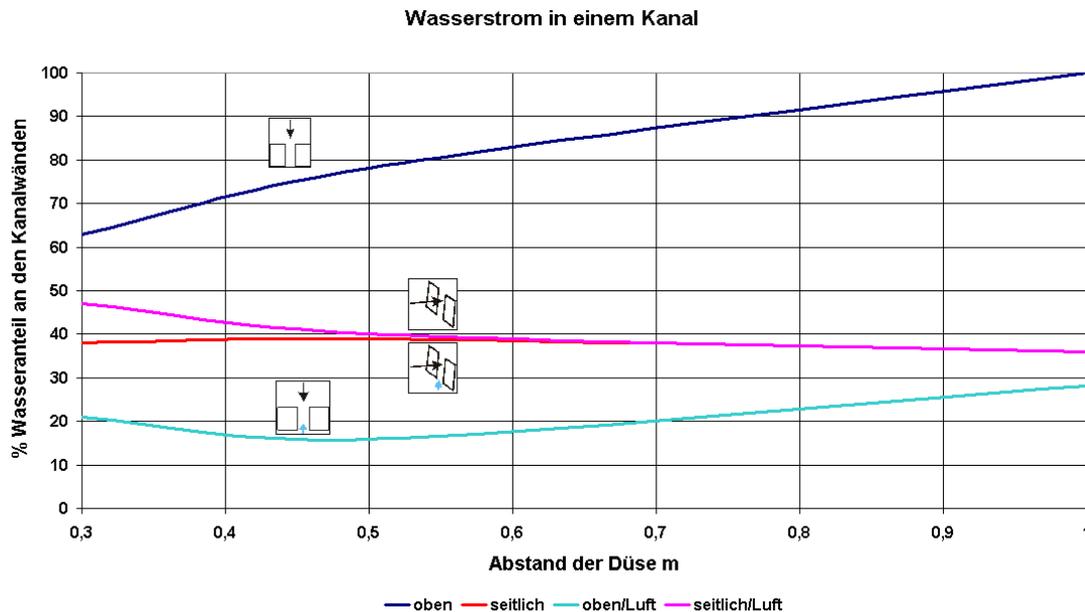


Abbildung 26: Prozentualer Anteil des in den Kanal eindringenden Wasserstroms

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Effizienz des Löschwasserstrahls in engen Kanälen deutlich geringer ist als auf ebenen und vollkommen einsehbaren Flächen. Mit der stationären Löschdüse besteht bei ausreichender Entfernung zum Objekt vor allem in der Anfangsphase eines Brandes die Möglichkeit, auch in engen Kanälen benetzend zu wirken. Mit zunehmender Brandentwicklung wird das Eindringen des Wassers deutlich schwieriger. Die mobile Variante der Düsenanordnung von der Seite ließ keine wesentlichen Unterschiede im prozentualen Anteil des eingedrungenen Wassers bei Versuchen mit und ohne Luftströmung im Kanal erkennen. Es wurde aber deutlich, dass die Effizienz gegenüber der stationären Löschdüsenanordnung deutlich gemindert ist.

Das Ziel jedes Löschversuches ist, das Löschwasser gezielt auf allen Oberflächen des brennbaren Stoffes aufzubringen. Weisen Versuchsobjekte verdeckte Brandflächen auf, die durch Abdeckungen, Umhüllungen usw. gebildet werden, wird der Verbrauch an Löschmittel erheblich ansteigen. Meist sind solche Objekte mit der normalen Löschtaktik nicht zu löschen und es muss auf Hilfstechiken zurückgegriffen werden, wie die mechanische Zerstörung von Abdeckungen durch Einreißhaken. Ohne diese Techniken würde die Effizienz des Löschmittels auf ein Minimum absinken.

Diese Aussagen wurden belegt durch Untersuchungen an Flächen, die mit dem Löschmittel nicht direkt erreicht werden konnten. Als Beispiel wurden Brandstoffoberflächen, die sich auf der Leeseite des Löschmittelstroms befinden, ausgewählt. Diese Brandflächen können vom Standort der Einsatzkräfte nicht direkt mit Wassertropfen erreicht werden. Es ist nur denkbar, dass das Löschwasser die leeseitigen Oberflächen nur erreicht durch Abfließen von Wasser über Kanten von bereits mit Wasser benetzten Oberflächen. Als Modell für die Ausbreitung des Wassers dienen in einem Winkel von 60° geneigte Oberflächen, die mit Pappe und Kunststoff (PE) bedeckt wurden. Das Löschwasser wurde über die obere Kante der geneigten Fläche gleichmäßig auf der gesamten Kantenlänge ausgegeben. Die Abbildung 27 zeigt die typischen Benetzungsbilder.

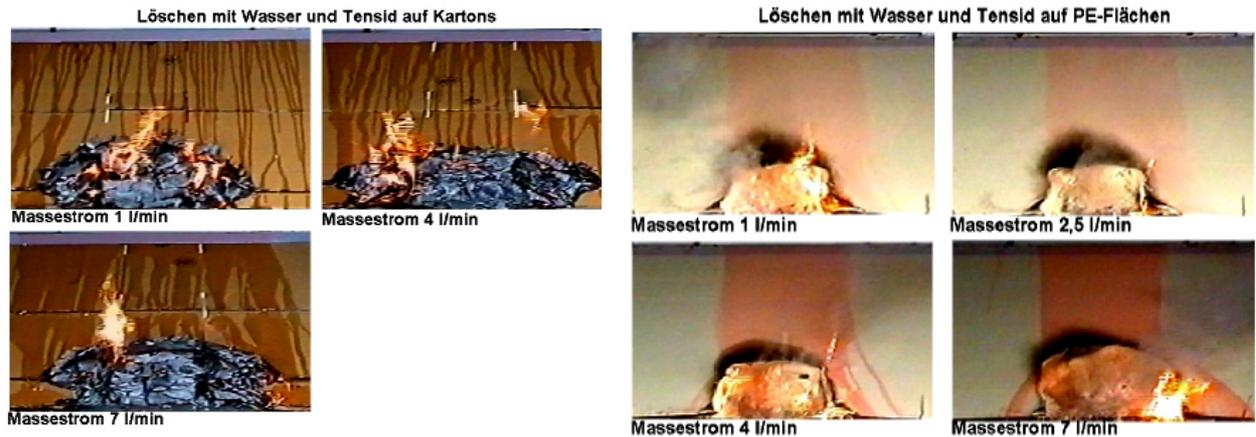


Abbildung 27: Versuche zur flächigen Benetzung von geneigten brennenden Brandstoffoberflächen

Die Bilder (Abbildung 26) zeigen die Versuchsausführung mit tensidhaltigem Wasser. Bei der Benetzung der Pappe (Kartons) sind deutlich einzelne Rinnsale zu sehen, die sich mit zunehmendem Löschmittel-Massenstrom verbreiterten. Eine vollständige Benetzung erfolgte nicht. Es war klar erkennbar, dass das Wasser die Flächen im Brandbereich durch Aufwölbungen und Verkohlung des Materials gar nicht erreichen konnte. Das Wasser floss um den Brandherd herum und ging verloren. Für die Versuche mit Kunststoff wurde das Löschwasser rot eingefärbt, um die Wasserfilme besser erkennbar zu machen. Beim Kunststoff PE kam eine Benetzung der Oberflächen zustande. Es zeigte sich aber sehr deutlich, dass das Wasser trotz Benetzung den Brandherd nicht erreichen konnte. Das Löschwasser floss auch hier um den Bereich des heißen brennenden Oberflächenareals herum und ging ungenutzt ab.

Ursachen für das Verhalten des Wassers sind, dass Flüssigkeiten beim Fließen auf Oberflächen immer auf dem günstigsten Weg abfließen. So entstanden die Mäander beim Abfließen des Wassers auf der Pappe. Die glatte Oberfläche des Kunststoffes bot auf der gesamten Fläche gleiche Bedingungen. Es konnte sich ein Wasserfilm ausbilden. Traten allerdings Hindernisse auf der Fläche auf, wie die Brandfläche, so umfloss der Wasserfilm dieses Hindernis. Die Ursachen dafür waren neben Aufwerfungen der Oberfläche auch die Temperatur der heißen Schmelze. In ihrer Nähe verdampfte das Wasser schneller und Filme geringer Dicke erreichten das Zentrum des Brandherdes mit der höheren Temperatur nicht.

Wasserfilme größerer Intensität kamen am Rand mit der Schmelze in Berührung. Da die Temperatur der Schmelze deutlich über dem Siedepunkt des Wassers lag, kam es im Randbereich zur Verdampfung von Wasser und zum Abkühlen und Erstarren der Schmelze. Die gebildeten Luftblasen im erstarrten Kunststoff bildeten schließlich eine mechanische Barriere, die der Wasserfilm nicht mehr überwinden konnte. Er floss um die Schmelze herum.

Diese Wirkungen werden mit zunehmender Branddauer und damit höherer Temperatur an den Oberflächen der brennbaren Stoffe deutlich gesteigert und verhindern das Abkühlen der verdeckten Brandflächen vollständig. Diese Flächen können in diesem Stadium nur dann gelöscht werden, wenn

- ◆ die Einsatzkräfte eine Möglichkeit der direkten Aufbringung des Löschwassers finden,
- ◆ die Oberflächen durch mechanische Veränderungen freigelegt und so einer direkten Brandbekämpfung zugänglich werden,
- ◆ die Brandobjekte zu einem späten Zeitraum der Verbrennung in sich zusammenfallen und damit eine gleichmäßige Oberflächenstruktur entstanden ist.

4.3.2 Ergebnisse der Untersuchungen an brennbaren Flüssigkeiten (Brandklasse B)

Brennbare Flüssigkeiten können mit Löschwasser, die keine Zusätze enthalten, nicht gelöscht werden. Erst der Zusatz grenzflächenaktiver Stoffe ermöglicht die Herstellung von Schäumen, welche die Oberflächen brennbarer Flüssigkeiten abdecken können und damit die Zuführung brennbarer Dämpfe in die Verbrennungszone einerseits sowie die Rückführung der Wärmestrahlung aus den Flammen auf die Oberflächen der brennbaren Flüssigkeiten verhindern bzw. verzögern. Die direkte Einflussnahme der Schaumschichten auf den Massefluss brennbarer Flüssigkeitsdämpfe und den Energierückfluss sind die Ursachen der Löschwirkung von Schäumen. Zur Brandbekämpfung werden gegenwärtig fünf unterschiedliche Schaummittelarten und ein Sonderschaummittel verwendet, die auch unterschiedliche Löschwirkungen erzielen:

- ◆ **Proteinschaummittel** (Sie enthalten kurzkettige, wasserlösliche Eiweißbruchstücke, die aus tierischem Eiweiß vor allem Horn oder Blut durch Hydrolyse hergestellt werden. Die Eiweiße stellen grenzflächenaktive Stoffe dar, die allerdings keine Netzmittel sind.)
- ◆ **Fluorproteinschaummittel** (Sie bestehen aus wasserlöslichem Eiweiß und Fluortensiden.)
- ◆ **Mehrbereichsschaummittel** (Sie bestehen aus Tensiden, die eine hydrophobe Kohlenwasserstoffkette und eine hydrophile Gruppe aus Kohlenstoff, Sauerstoff, Schwefel, Phosphor oder Stickstoff in unterschiedlichster Anordnung besitzen, auch Kohlenstoffenside genannt. Mehrbereichsschaummittel enthalten keine Fluortenside.)
- ◆ **Filmbildende Schaummittel (AFFF-Schaummittel)** (Sie bestehen aus Fluortensiden und Kohlenstoffensiden. Die hydrophobe Gruppe der Fluortenside wird aus einer perfluorierten Kohlenstoffkette gebildet, die hydrophile Gruppe entspricht den hydrophilen Gruppen der Kohlenstoffenside.)
- ◆ **Schäume zur Brandbekämpfung der Brandklasse A (Class A Foam)** (Sie bestehen aus Kohlenstoffensiden und Zusätzen, welche die Wirkung bei brennenden Feststoffen erhöhen, wie organische Salze – Lactate, Acetate ; oder auch anorganische Salze – Phosphate, Sulfate, sowie organische Polymere.)
- ◆ **Alkoholbeständige Schaummittel** (Sie bestehen aus AFFF-Schaummittel oder Mehrbereichsschaummittel **und** einem hochmolekularen, in Wasser quellfähigem **Polymer**, welches in polaren organischen Stoffen wie Alkoholen, Estern, Ketonen oder Aminen nicht entwässert werden kann.)

Proteinschaummittel bilden ausschließlich Schwerschäume mit geringer Verschäumungszahl. Die Stabilität der Schäume ist sehr hoch. Sie verstärkt sich nach der Verschäumung sogar noch, so dass diese Schäume nicht sehr gut über die Oberfläche brennbarer Flüssigkeiten fließen und an den Begrenzungsflächen nur langsam den Dampfstrom der Flüssigkeit unterbinden. Proteinschaummittellösungen besitzen keine benetzende Wirkung.

Mehrbereichsschaummittel lassen sich mit unterschiedlichen Geräten zu Schwerschäum, Mittelschäum oder Leichtschäum verschäumen. Die Schaumarten unterscheiden sich in der Verschäumungszahl und damit im Gehalt an wässriger Lösung und Luft sowie in ihrer Dichte. Die Anwendung von Mehrbereichsschaummitteln beschränkt sich meist auf Schwerschäum und in seltenen Fällen auf Mittelschäum.

AFFF-Schaummittel (**A**queous **F**ilm **F**orming **F**oam) werden in allen Fällen als Schwerschäum genutzt. Dies ist erforderlich, damit das aus dem Schäum abfließende Drainagewasser einen sogenannten Wasserfilm auf der Oberfläche von Kohlenwasserstoffen bilden kann. Dieser Wasserfilm schützt eine gelöschte Oberfläche brennbarer Kohlenwasserstoffe längere Zeit vor Rückzündungen durch Zündquellen.

Bei den Fluorproteinen werden die Filmbildung und die benetzenden Eigenschaften durch den Gehalt an Fluortensiden auf die Proteinschäume übertragen. Aufgrund der hohen Stabilität der Proteinschäume ist deren Effizienz geringer.

Class A Schaummittel sind vorzugsweise für die Brandbekämpfung großer landwirtschaftlicher Flächen, Graslandgebiete oder auch leichtbrennbarer Gebäude (Holzbauweise) entwickelt worden. Sie gewähren eine gute Benetzung fester Brandstoffe und besitzen aufgrund ihrer Zusatzstoffe eine nachhaltige Wirkung gegenüber Rückzündungen.

Alkoholbeständige Schaummittel werden sowohl als AFFF-A Schaummittel als auch als Mehrbereichsschaummittel angeboten. Weil polare organische Flüssigkeiten sich mit Wasser vollständig oder teilweise mischen, kann die organische Flüssigkeit in die Schaumlamellen eindringen und deren Stabilität entscheidend verringern. Mit dem Einbau der größeren organischen Moleküle wird die Struktur der Schaumlamelle destabilisiert, so dass die Schaumdecke je nach Polarität, Löslichkeit und Dampfdruck der organischen Flüssigkeit zusammenfällt. Auch kann sich an der Flüssigkeitsoberfläche kein Wasserfilm aufbauen, weil das Wasser sich sofort mit der organischen Flüssigkeit vermischt. Die Wirksamkeit der alkoholbeständigen Schaummittel beruht ausschließlich auf der Wirkung des polymeren Zusatzes, welcher ein voluminöses wässriges Gel während der Verschäumungsphase entwickelt. Dieses Gel nimmt nur wenig organische Flüssigkeit auf und bleibt als solches auch auf der Oberfläche der organischen Flüssigkeit erhalten. Es bildet zwischen dem Schaum und der Oberfläche der Flüssigkeit eine zusätzliche Schicht, die den Schaum vor direkter Zerstörung schützt. Die Palette der polaren, in Wasser gut löslichen organischen Flüssigkeiten ist sehr umfangreich. Es ist deshalb bei der Auswahl der Schaummittel für polare Medien immer angeraten, die Effizienz des Schaummittels bezogen auf die konkrete Flüssigkeit zu überprüfen. Eine einfache Abschätzung der Wirksamkeit der Schaummittel lässt sich für unterschiedliche organische Flüssigkeiten an Hand ihres Flammpunktes und ihrer Löslichkeit in Wasser nach einem durch die [3M 1992] veröffentlichten Diagramm (Abbildung 28) durchführen.

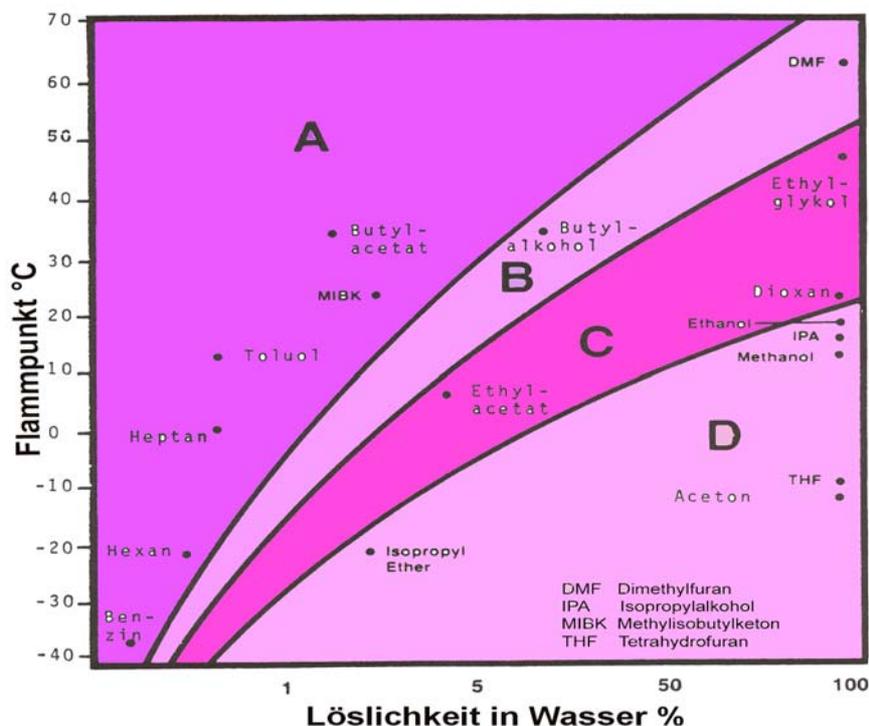


Abbildung 28: Abschätzung der Wirksamkeit von Löschmitteln bei polaren Medien

Erläuterung:

Gruppe A Flüssigkeiten sind mit normalen Schaummitteln löschar

Gruppe B Flüssigkeiten sind mit normalen Schaummitteln bei erhöhter Anwendungsrate löschar

Gruppe C und D Flüssigkeiten sind mit alkoholbeständigen Schaummitteln löschar, Gruppe D erfordert unbedingt die empfohlene Anwendungsrate.

Bei der Brandbekämpfung in Tunneln muss auf sehr effiziente Schaummittel für typische brennbare Flüssigkeiten, insbesondere Kraftstoffe (Kohlenwasserstoffe mit Zusätzen) und Alkohole zurückgegriffen werden. Im Rahmen der Veränderungen in der Zusammensetzung

heutiger Kraftstoffe wurden eine Reihe von Versuchen durchgeführt, bei denen die Wirksamkeit der verschiedenen Schaummittel getestet wurden. Insbesondere erfolgte in der Formulierung der Kraftstoffe der Ersatz des MTBE (Methyl-tertiärer-butylether) durch ETBE (Ethyl-tertiärer-butylether) und der Verschnitt der Kohlenwasserstofffraktionen mit Ethanol (Ethylalkohol). Diese Versuche wurden in einem verkleinerten Versuchsmaßstab nach dem so genannten LASTFIRE-Test durchgeführt [Wilson 2005]. Der Test wird in einer Brandwanne von 4,5 m² Grundfläche und einer Höhe von 0,61 m durchgeführt (Abbildung 29). Die Brandwanne besteht aus normalen Kohlenstoffstahl und hat eine Wandstärke von 6 bis 10 mm. In der Wanne sind seitlich zwei gegenüberstehende zur Wannenummitte gerichtete Schikanenbleche gleicher Wandstärke angebracht. Die Ausführung der Brandwanne ermöglicht eine maximale Wärmeübertragung auf die brennbare Flüssigkeit und verstärkt ihren Abbrand.



Abbildung 29: LASTFIRE-Brandwanne

Die beim LASTFIRE-Test verwendeten Strahlrohre entsprechen den in der Praxis verwendeten Löscheräten. Es werden drei verschiedene Strahlrohre eingesetzt:

- ◆ System-Nozzle für die stationäre Brandbekämpfung mit stationären Löschanlagen unter Verwendung von Gießkrümmern oder so genannten Schaumtöpfen,
- ◆ Aspirating-Nozzle für die mobile Brandbekämpfung mit normalen Schaumrohren
- ◆ Semi Aspirating-Nozzle für die mobile Brandbekämpfung mit Schaummonitoren .

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind wie folgt zusammenzufassen:

Gegenwärtig können alle neuen Zusammensetzungen von Kraftstoffen mit den handelsüblichen Schaummitteln für nichtpolare Flüssigkeiten gelöscht werden. Die Löschwirkung der unterschiedlichen Schaummittel nimmt in der Reihe

Protein- und Mehrbereichsschaum < Fluorproteinschaum < AFFF – Schaum

zu. Zwischen Fluorproteinschaum und AFFF-Schaum bestehen nur geringe Unterschiede beim Löschen. Jedoch besitzt AFFF-Schaum eine erhöhte Sicherheit gegenüber Rückzündungen. Die nachfolgende Bildauswahl (Abbildungen 30 und 31) zeigt das typische Verhalten von Fluorprotein- und AFFF-Schäumen im Test.



Abbildung 30: Löschergebnis bei Fluorproteinschaum



Abbildung 31: Löschergebnis bei AFFF-Schaum

Bei der Tunnelbrandbekämpfung sollte unter der Voraussetzung, dass Gefahrgüter der Klasse 3 für den Transit durch den Tunnel zugelassen sind, grundsätzlich ein AFFF-Schaummittel eingesetzt werden. Die mit diesem Schaummittel erreichbare Sicherheit zur Verhinderung der Rückzündung bereits gelöschter Flächen kann mit anderen Schaummitteln nicht erzielt werden. Da entstehende Dämpfe im Tunnel deutlich schneller explosive Gemische ausbilden, ist der AFFF-Schaummitteleinsatz für die Sicherheit der Einsatzkräfte ein wesentlicher Schwerpunkt der Risikominimierung. Für stationäre Löschanlagen in Tunneln sollten in gleicher Weise filmbildende Schaummittel eingesetzt werden. Werden Gefahrgüter der Klasse 3 ausgeschlossen, so reichen für die Brandbekämpfung vorzugsweise Mehrbereichsschaummittel bzw. Proteinschaummittel aus.

Bei verschiedenen alkoholbeständigen Schaummitteln und auch bei Schaummitteln für die Brandklasse A, deren Zusammensetzungen vorzugsweise polymere gelbildende Stoffe enthält, können einige Flüssigkeiten sehr schnell die Schaumschicht überwinden. Dies geschieht in diesen Fällen durch Ausbildung von Dampfkavernen unter dem Schaum, die sich dann als kompakte Blase durch den Schaum an die Oberfläche bewegen. Derartige Schaumschichten entflammen durch Zündquellen. In der Mehrzahl der Fälle führt die Rückzündung dann schnell zum Vollbrand. Treten bei Schäumen derartige Blasen auf, muss unbedingt die Ursache für die geringe Stabilität des Schaums gefunden werden. Oftmals sind geringfügige Zumischungen in der brennbaren Flüssigkeit die Ursache dafür, wie z.B. Alkohole oder andere Mittel zur Verbesserung der Klopfestigkeit bei Benzenen. Die Bildfolge in Abbildung 32 zeigt einen solchen Durchtritt von Dämpfen durch eine Schaumdecke.



Abbildung 32: Löschversuche mit zur Kavernenbildung neigenden Schaum

4.4 Löschanlagen

Stationäre Lösch- und Brandunterdrückungsanlagen für den Einsatz in Tunneln werden schon seit längerer Zeit diskutiert. Die Debatte über die Verwendung von Wassersprühsystemen in Tunneln ist seit den nachteiligen Ergebnissen der Versuche mit Sprinklern in der Offenegg-Testserie in der Schweiz 1965 nicht abgeschlossen. Die wichtigsten Resultate ergaben sich aus drei Tests mit Poolbränden von Benzin (6,6 m² ; 47,5 m² und 95 m² Brandfläche), die mit einer Berieselungsanlage (Anwendungsrate 19 l/min m²) ohne Schaummittelzusätze bekämpft wurde. Die Ergebnisse können in folgenden Schlüsselaussagen zusammengefasst werden [Ingason 2006/1]:

- ◆ Mit dem Sprühwasser konnten die Brände innerhalb kurzer Zeit gelöscht werden.
- ◆ Die Sichtverbesserung wurde aufgrund der Turbulenz durch das versprühte Wasser geschaffen. Es erfolgte eine wirksame Abkühlung der Rauchsicht und ihre Destratifizierung, so dass der Rauch das gesamte Tunnelvolumen ausfüllte
- ◆ Die Wassertropfen verdunsteten. Der heiße Dampf wirkte wärmeübertragend auf alle organischen Materialien, sogar in beträchtlichem Abständen vom Brandherd.
- ◆ Die Dampfproduktion drückte den heißen Rauch in die Abschnitte des Nachbartunnels und verursachte dort höhere Temperaturen als bei Versuchen ohne Sprühwasser.
- ◆ Im letzten Test (95 m² Benzinbrand) verdampfte das Benzin nach dem Löschen der Flammen weiter. Die Dämpfe breiteten sich im Tunnel aus und mischten sich mit Luft. Nach etwa 20 Minuten Testzeit führte die Zündung der Benzindämpfe an heißen Objekten im Brandbereich zu einer Deflagration. Die mit einer Geschwindigkeit bis zu 30 m/s ablaufende Deflagration verursachte im Tunnel Schäden an der Belüftungsinstallation.

Diese Ergebnisse sind der Grund für den bis heute anhaltenden Widerstand bezüglich der Installation von Wassersprühsystemen in Tunneln. Sie dienen auch aktuell noch als Argumente in den PIARC-Richtlinien, in die noch weitere negative Argumente integriert wurden wie

- ◆ leicht entzündliche Flüssigkeiten können auf nassen Oberflächen weggespült werden und die Ausbreitung des Brandes unterstützen,
- ◆ die geringere Effizienz bei Bränden innerhalb von Fahrzeugen, die allerdings auch beim Einsatz mobiler Kräfte zur Brandbekämpfung vorhanden ist,
- ◆ die Tatsache, dass eine Fehlaktivierung der Berieselungsanlage Verkehrsunfälle initiieren könnte und
- ◆ die Instandhaltung stationärer Anlagen kostspielig sein kann.

Weitere Argumente bestehen in der Gefahr des Einfrierens der Sprühflutanlagen in den Wintermonaten und die hohen Kosten der Installation dieser Anlagen.

Trotzdem sind in den letzten Jahren in verschiedenen Ländern stationäre Löschanlagen in Tunneln installiert worden. So wurden in den nordischen Ländern zwei Wassersprühsysteme für spezielle Anwendungen installiert, in den USA erhielten drei Tunnel stationäre Löschanlagen. Unbeeindruckt von den negativen Ergebnissen der Ofenegg-Versuche wurde die erste stationäre Löschanlage in Japan bereits in den 60iger Jahren in Betrieb genommen. Heute sind in Japans Tunneln mehr als 30 stationäre Löschanlagen in Betrieb. In Japan werden stationäre Löschanlagen in Tunnels installiert, wenn die Länge des Tunnels und sein Verkehrsvolumen dies erfordern [Stroeks 2001]. Für Tunnel mit Längen größer 10 km sind immer Sprühsysteme erforderlich, ebenso für Tunnel mit Längen zwischen 3 km und 10 km, wenn darin Gegenverkehr herrscht und den Tunnel mehr als 4000 Fahrzeuge pro Tag passieren. Die Sprühabschnitte sind standardisiert auf 25 m oder 50 m, wobei 2 Abschnitte in Betrieb genommen werden können. Das Standardvolumen an Wasser beträgt 6 l/min m² bei 3 bis 3,5 bar Druck. Die Zielstellung dieser Anlagen ist,

- ◆ den Brandherd und seine Umgebung abzukühlen,
- ◆ den Brand zu kontrollieren,
- ◆ die Brandausbreitung zu verhindern und
- ◆ die Aktivitäten der Brandbekämpfung zu unterstützen.

Die Wirksamkeit dieser Anlagen wurde in mehreren Brandtests (Kakeitou-Tunnel und Shimizu-Tunnel Nr. 3) bestätigt.

Eine weitere bedeutende Testserie fand im Memorial-Tunnel in West-Virginia (USA) statt [Memorial 1995]. Bei 6 Tests wurde die Anwendung einer Sprühschaumanlage untersucht. Als Brandstoff wurde Heizöl eingesetzt. Die Energiefreisetzung betrug bei 5 Tests 50 MW und bei einem Test 100 MW. Zur Schaumerzeugung wurde dem Löschwasser 3 % AFFF-Schaummittel zugemischt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Wirksamkeit der Sprühschaumanlage bis zu einer längsverlaufenden Belüftungsgeschwindigkeit von 4,2 m/s erhalten blieb. Bei 4 Tests wurden die Brände in weniger als 30 Sekunden gelöscht. Die Löschzeit war etwa 2 Minuten länger, wenn die Düsen entlang der Wand vom Tunnel installiert waren (2 Tests).

Die Versuche im 2. Benelux-Tunnel wurden mit Wassersprühsystemen ausgeführt [Lemaire und Kenyon 2006]. Als Brandstoffe dienten Holzpaletten und Gummireifen. Die Tests sollten Erkenntnisse über die Produktion von Wasserdampf, die Minderung der Sichtverhältnisse und die Kühlwirkung der Anlage erbringen. Die Anwendungsrate betrug 12,5 l/min m². Es wurde festgestellt, dass eine Sprühflutanlage die Temperaturen des Rauchgases und die der Fahrzeuge bedeutend verringert. Damit wird auch das Risiko einer weiteren Brandausbreitung gemindert. Die Dampfproduktion war geringfügig, aber die Sichtbarkeit war erheblich verringert, so dass die Flucht beeinträchtigt wurde.

Nach [GDV 2005] verhindern Brandbekämpfungssysteme in einem Tunnel durch das frühzeitige Erkennen und Bekämpfen eines Brandes katastrophale Schäden, die durch das Feuer selbst oder durch den entstehenden Brandrauch bedingt sind. Ziel der Systeme ist es,

- ◆ die Flucht und Rettung von Personen zu ermöglichen,
- ◆ die Brandbekämpfung unmittelbar nach Ausbruch vorzunehmen und
- ◆ den Schutz des Bauwerkes sofort nach dem Ereignis einzuleiten.

Für die Auslegung des Brandbekämpfungssystems eines Tunnels ergeben sich die folgenden Parameter:

- ◆ Mindest-Wasserbeaufschlagung 15 mm/min
- ◆ Zumischung mindestens 3 % AFFF-Schaummittel
- ◆ Gruppenwirkfläche Tunnelbreite x 30 m (entspricht einer Löschsektion)
- ◆ Gesamtwirkfläche 3 x Tunnelbreite x 30 m
- ◆ Betriebszeit Wasserversorgung: Anrückzeit der Feuerwehr bis zum ungünstigsten Punkt zuzüglich 15 min, jedoch mindestens 30 min
- ◆ Betriebszeit Schaummittel: Anrückzeit der Feuerwehr bis zum ungünstigsten Punkt zuzüglich 15 min, jedoch mindestens 30 min, Hinweis: Die Anrückzeit ist mit der Feuerwehr abzustimmen.
- ◆ Düsenschutzfläche 9 m²
- ◆ Wasseraustrittszeitpunkt: spätestens 30 s nach Öffnen des Alarmventils
- ◆ Wasserversorgung: Beim Einsatz von Pumpen besteht die Wasserversorgung aus zwei Pumpen mit einem Vorratsbehälter oder drei Pumpen à 50 % mit einem Vorratsbehälter.

[Opstad und Stensaas 2006] berichten über Versuche mit verschiedenen Wasserebelsystemen (Hoch- und Niederdruck), die mit geringen HRR's (5 MW) und mittleren HRR's (20 MW) durchgeführt wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 aufgeführt. Es zeigte sich, dass bei kleineren Bränden mit geringen HRR's eine geringe Brandunterdrückung vorhanden war. Die besten Wirkungen der Anlagen wurden bei den höheren HRR's nachgewiesen. Bei diesen Bränden erreichten die Anlagen eine Minderung der HRR um ca. 50 % gegenüber der HRR bei freier Brandentwicklung.

Tabelle 27: Wirkung der Brandunterdrückung bei Wassernebelssystemen

| Brandszenario | HRR vor der Brandunterdrückung (MW) | Reduktion der HRR (%) | ungefähres Äquivalent zu |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Niederdruck-Wassernebelssystem | | | |
| 1 Wanne | 2 - 5 | 0 - 60 | 1 – 2 Pkw |
| 2 Wannen | 5 - 13 | 0 - 80 | Kleiner Van, 2 – 3 Pkw |
| 3 Wannen | 17 | 80 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| 4 Wannen | 22 - 24 | 70 - 80 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| Holzpaletten | 17 - 25 | 40 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| Hochdruck- Wassernebelssystem | | | |
| 1 Wanne | 4 - 5 | gering | 1 – 2 Pkw |
| 2 Wannen | 10 - 11 | 10 - 70 | Kleiner Van, 2 – 3 Pkw |
| 3 Wannen | 15 - 20 | 10 - 70 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| 4 Wannen | 18 - 25 | 10 - 70 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| 4 Wannen AFFF | 18 | 50 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |
| Holzpaletten | 17 - 20 | 50 - 80 | Großer Van, öffentlicher Bus, Lkw |

Diese Ergebnisse sind vergleichbar mit den Untersuchungen zum Löschen von Bränden mit Wassernebel, die beispielsweise auf dem Test- und Trainingsschiff ex-USS Shadwell durchgeführt wurden [DiNenno et al. 1996]. Auch in diesen Löschversuchen zeigte sich, dass kleine Brände mit geringer HRR nicht zu löschen waren, während das bei größeren Bränden problemlos gelang, wenn die Anordnung der Löschdüsen und die Anwendungsrate richtig gewählt waren.

Ebenfalls im Jahr 1996 untersuchten [Yuan und Lazzara 1996] die Möglichkeiten, Verletzungen durch Feuer in der Bergbauindustrie zu reduzieren. Als Teil dieser Untersuchung wird die Anwendung von Wasser-Nebel für die Brandunterdrückung im unterirdischen Bergwerksbetrieb für Bereiche der Lagerung von Dieselöl eingeschätzt. Es wurden Brände mit HRR's von 230 kW, 1MW und 3MW untersucht, um die Wirkungen der Belüftung und der Vorbrennzeit auf das Löschen mit Wasser-Nebel bei Diesel-Pool-Bränden zu bestimmen. Ohne Belüftung war der Brand mit 230 kW am schwierigsten zu löschen. Bei natürlicher Belüftung war die Löschzeit für den 1MW-Brand am längsten. Der herausfordernde Brand stellte sich bei einer HRR von 3MW und erzwungener Belüftung ein. Diese Ergebnisse sind vor dem Hintergrund des Löschens mit Wassernebel zu erklären. Wassernebel kann sowohl durch Kühlung in der Gasphase eine Verringerung der HRR erreichen als auch durch Minderung der Sauerstoffkonzentration die Verbrennungsreaktion beeinflussen. Insbesondere die Minderung der Sauerstoffkonzentration wird nahezu unwirksam, wenn eine Luftströmung den Wasserdampf als Löschmittel aus dem Löschbereich führt. Die örtliche Kühlung sowohl im Flammenbereich als auch im Bereich der Rauchgase bleibt im wesentlichen erhalten.

[Vaari 1999] weist in seinen Empfehlungen für die Gestaltung von Versuchen mit Wassernebel darauf hin, dass möglichst zugfreie Anordnungen gewählt werden sollten, um die volle Wirkung des Nebels zu erreichen. Wenn Objekte im normalen Gebrauch eine Luftströmung aufweisen, sollte diese auch im Versuch berücksichtigt werden. Besondere Schwerpunkte sieht [Vaari 1999] in der Anordnung der Löschdüsen und deren Abstand zum Brandstoff. Für jedes Brandobjekt existiert somit ein Optimum der Unterdrückungswirkung, welches durch das Spraymuster, den Abstand zum Brandstoff und der Raumströmung bestimmt wird.

Durch die [U.S. Navy 1997] wurden im Rahmen der Konferenz zur Ablösung von Halonen als Löschmittel die zur damaligen Zeit bekannten Kenntnisse zur Löschwirksamkeit von Wassernebel zusammengefasst. Bereits 1997 war durch zahlreiche Studien und einem breiten Bereich von Anwendungen die Wirksamkeit von Wassernebelanlagen demonstriert worden. Löschanlagen mit Wassernebel hatten sich bei folgenden Anwendungen bewährt:

- ◆ Freistrahlblände der Brandklasse B ,
- ◆ Poolfeuer,
- ◆ Brände in Flugzeugkabinen,
- ◆ Brände in Schiffsmaschinenräumen,
- ◆ Brände in Schiffskabinen und
- ◆ Brände bei Computertechnik sowie Elektronik.

Es wird schließlich der Unterschied zwischen der Wirkung von Wasserdampf als Löschmittel und als Mittel zur Brandunterdrückung deutlich herausgearbeitet. Im Fall einer Löschanlage mit Wasserdampf muss die Anlage ausreichend feine Wassertropfen bilden, die in der erforderlichen Löschkonzentration alle Volumina des zu löschenden Objektes ausfüllen können und damit die Grenzbedingungen für ein räumliches Löschen erreichen. Weil der Wasserdampf neben seiner kühlenden Wirkung im Raum und an den Oberflächen, an denen er sich niederschlägt, zusätzlich inertes Wasserdampf bildet, kann in geschlossenen Räumen die Löschwirksamkeit deutlich gesteigert werden. Der Wasserdampf als Gas ist in der Lage, alle verdeckten Volumina innerhalb des Objektes zu erreichen und wirkt damit wie ein echtes Löschgas unterstützend für den Wasserdampf. Diese Wirkung erklärt auch die hohe Effizienz des Wasserdampfes in geschlossenen Räumen. Wenn allerdings die Energie des Brandes gering ist, kann sich nur wenig Wasserdampf ausbilden, wodurch es zu einer deutlichen Minderung der Löschwirkung kommt. Ebenso wird die Effizienz des Wasserdampfes durch die Raumventilation gemindert, weil mit dem heißen Rauchgas auch der bereits entstandene Wasserdampf aus dem Löschbereich abgeführt wird.

[Mawhinney 1994] zeigte, dass die erforderliche Anwendungsrate für Wasserdampf bei Löschanlagen erheblich von den Umgebungsbedingungen abhängt. Bei geschlossenen Räumen erreichte er mit Anwendungsraten von etwa 3,5 l/min m² Löscherfolge. Wenn allerdings die Bedingungen durch Ventilation oder durch versperrte Volumina innerhalb des Objektes verändert wurden, konnten Löscherfolge erst bei Anwendungsraten von 6 bis 16 l/min m² erreicht werden.

Deutlich anders sind Wasserdampfanlagen zu verstehen, die für eine Brandunterdrückung eingesetzt werden. Diese Anlagen sind darauf ausgelegt, den Brand zu bekämpfen ohne jedoch die Zielstellung des vollständigen Löschens. Die Wirkung von Brandunterdrückungsanlagen ist vor allem auf die Kühlung der Flammen, heißen Rauchgase und aller Oberflächen in unmittelbarer Umgebung des Brandherdes ausgerichtet. Dadurch werden die Brandentwicklung und -ausbreitung eingeschränkt, die HRR begrenzt, mögliche Folgereaktionen durch Erwärmung von Brandstoffen minimiert und die Rauchgasmengen gemindert.

Hersteller von Wasserdampf-Löschanlagen und -Brandunterdrückungsanlagen sind international überschaubar. Diese wenigen Hersteller besitzen allerdings ein fundiertes Wissen und eigene Erfahrung bei der Konzipierung und Installation ihrer Anlagen in den verschiedenen Anwendungsbereichen. Die Tabelle aus der Studie der [U.S. Navy 1997] wurde entsprechend dem heutigen Stand vertieft und zeigt die wichtigsten Anbieter von Wasserdampf-Anlagen und ihr spezielles Anwendungsprofil (Tabelle 28).

Tabelle 28: Hersteller von Wassernebel-Anlagen mit Anlagenparametern und Anwendungsprofil

| Hersteller | Art der Düsen/ Zerstäubung | Druckerzeugung | Anwendungen |
|--|-------------------------------|-----------------------------|--|
| ADA Technologies/Fike | Zweistoffdüse Zerstäubung | Gasflaschen, Niederdruck | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe |
| Reliable/Baumac | Einstoffdüse, Hochdruck | Pumpen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe |
| Kidde Deugra | Einstoffdüse, Niederdruck | Gasflaschen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe |
| Grinnell | Einstoffdüse, Mitteldruck | Pumpen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe |
| Marioff | Einstoffdüse, Hochdruck | Pumpen, Gasflaschen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Maschinenräume <3000 m ³ , Kabeltunnel und Kabelkanäle, Computer und Telekommunikation, Zug- und Tunnelschutz |
| Securiplex | Zweistoffdüse luftgestützt | Gasflaschen, Niederdruck | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe |
| Wormold/Total Walther | Einstoffdüse, Niederdruck | Pumpen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Maschinenräume, Sprühzonen unter Tage, Tunnel, unterirdische Verkehrswege, Ölplattformen, Windkraftturbinen, mit Ölen und Fetten arbeitende Geräte, Friteusen |
| Fogtec | Einstoffdüse, Hochdruck | Pumpen, Gasflaschen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, mobile Löschsysteme, Brandunterdrückungssysteme für Tunnel |
| Aquasys | Einstoffdüse, Hochdruck | Pumpen, Gasflaschen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Brandunterdrückung, Oresund-Tunnel, Mona-Lisa-Tunnel, Felbertauern-Tunnel |
| G&S Brandschutztechnik | Einstoffdüse, | | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Maschinenräume, EDV |
| Siemens Building Technologies GmbH & Co. oHG | Zweistoffdüse Mitteldruck | Pumpen, Gasflaschen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Maschinenräume, Schienenfahrzeugen und Tunnel |
| Yamato Protec Corp. | Einstoffdüse | Pumpen, Gasflaschen | Marine System |
| Danfoss | Einstoffdüse | Pumpen | Löschen brennbarer fester und flüssiger Stoffe, Marine System |

Ein weiteres System zur Brandbekämpfung in Tunneln basiert auf Schaum. Da allgemein bekannt ist, dass Schaummittellösungen in Brandbereichen mit höheren Temperaturen und hohem Anteil von Ruß sich nicht oder nur ungenügend verschäumen lassen [Bobert 2001], wurde bei diesem System die zur Verschäumung erforderliche Luft von Außen mit der Schaummittellösung vermischt unter Druck zugeführt. Dieses System wird als CAFS-System bezeichnet. Durch die bereits in der komprimierten Phase stattfindende Vermischung der Luft mit der Schaummittellösung wird bei Austritt des Gemisches aus der Düse ein gleichmäßiger und stabiler Schaum erzeugt, der trotz geringster Zumischung an Schaummittel (<1%) auch gegenüber brennbarer Flüssigkeiten hohe Stabilität besitzt.

Mit einer stationären Druckluftschaumanlage wurden 2005 im Runehamar-Tunnel full-scale Versuche mit brennbaren Flüssigkeiten und Feststoffen im Auftrag des Niederländischen Ministeriums für Transport ausgeführt [Rudzok und Dorau 2005]. Im Ergebnis dieser Versuche

konnten Brände mit einer HRR von mehr als 180 MW (brennbare Feststoffe und brennbare Flüssigkeiten) sicher beherrscht werden. Der Versuch mit brennbaren Feststoffen wurde mit 720 gestapelten Europaletten (Holz 80% und Kunststoff 20 %) ausgeführt. Die Paletten wurden in einem Stapel von 14,4 m x 2,4 m x 3 m aufgeschichtet. Die Aktivierung eines Löschsegments der Löschanlage von 12,5 m Länge erfolgte 5 min nach der Zündung für 40 Sekunden. Die HRR hatte zu diesem Zeitpunkt etwa 170 MW erreicht. Nach 40 s wurde nacheinander je ein weiteres Segment in Betrieb gesetzt, wobei aber immer nur ein Segment Schaum lieferte. Bereits nach dem 4. Zyklus (480 s) war die Temperatur unter 200 °C gesunken (Abbildung 33). Im Versuch wurde die Hauptbrandlast im mittleren, zuerst in Betrieb genommenen Segment, gelagert.

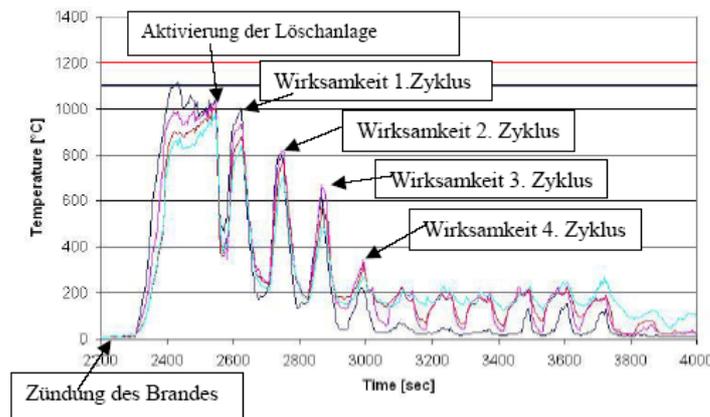


Abbildung 33: Temperaturkurve des Löschversuches im Runehamar-Tunnel

Der größte Versuch wurde mit brennbarer Flüssigkeit (5000 l Dieselkraftstoff) in einer Brandwanne von 25 m x 4 m ausgeführt. Der Vollbrand wurde nach 5 min erreicht. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Brandleistung etwa 140 MW. Der Löschvorgang wurde mit den beiden äußeren Löschbereichen begonnen. Dabei stiegen die Temperaturen nach dem Wechsel der Löschsegmente wieder an. Nachdem der zentrale Löschbereich aktiviert worden war, konnte der Brand in 120 s gelöscht werden.

Die Auswertung der Literatur auf dem Gebiet der stationären Lösch- und Brandunterdrückungsanlagen zeigt, dass umfangreiche Kenntnisse über die Wirksamkeit dieser Anlagen zur Verfügung stehen. Da aber jede Anlage eine spezifische Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten erfordert, besteht insbesondere im Bereich der technischen Ausführung noch Forschungsbedarf, der jedoch weitgehend durch die Anbieterfirmen bei ihrer ingenieurtechnischen Anpassung an ein konkretes Objekt geleistet werden sollte. Unbestritten kann abgeleitet werden, dass sowohl Löschanlagen als auch Brandunterdrückungsanlagen bei Bränden in Tunneln eine Wirkung zeigen und deshalb die durch die Ofenegg-Versuche begründete Meinung nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Allerdings sollten bei Entscheidungen zur Installation von stationären Anlagen grundsätzliche Randbedingungen beachtet werden:

- ◆ Die Verkehrsdichte ist ein wesentlicher Entscheidungsparameter. Es ist sicher, dass bei hoher Verkehrsdichte die Wahrscheinlichkeit von Unfällen steigt. In gleichem Maß wird dann auch die mittlere Zahl der unmittelbar betroffenen Personen ansteigen.
- ◆ Die Bedeutung des Tunnels für den nationalen und den Transitverkehr müsste ein weiteres Kriterium sein. Es darf nicht vorkommen, dass sehr stark frequentierte Tunnel, auch wenn sie nur geringe Längen aufweisen, ungeschützt bleiben. Ein Beispiel hierfür ist der Interstate 5 Tunnel bei Santa Clarita / Californien [Thompson 2008]. Nach einem Unfall mit mehr als 20 Fahrzeugen in dem nur 200 m langen Tunnel konnte der Brand nicht gelöscht werden. Der Tunnel stürzte ein und musste für 5 Monate geschlossen werden. Die Kosten für die Umgehungsstrecke (Hauptverbindung zwischen Los Angeles und San Francisco) und die Rekonstruktion des Tunnels betragen mehr als 10^8 US \$.

- ◆ Tunnel in unmittelbarer Nähe von städtischen Ballungszentren weisen neben einem hohen Verkehrsaufkommen infolge der zunehmenden Verkehrsdichte in bestimmten Zeitabschnitten Unregelmäßigkeiten im Verkehrsfluss auf, so dass Staus die Folge sind. In Stausituationen können Verkehrsunfälle zu erheblichen Problemen aufwachsen und Situationen vorbereiten, die Katastrophen gleichkommen. Im Burnley-Tunnel waren bei einem Massenunfall in der Hauptverkehrszeit 4 Lkw und 3 Pkw zusammengestoßen und die brennbaren Materialien wurden gezündet. Der Verkehr im Tunnel kam vollkommen zum Erliegen. Außer den 3 Personen, die direkt durch den Unfall getötet wurden, waren aufgrund der funktionierenden Notfallplanung und dem sofortigen Eingreifen der Feuerwehr keine weiteren Personenschäden zu verzeichnen [Macnamara 2008].
- ◆ Tunnel in urbanen Gebieten können in der Mehrzahl nicht unmittelbar durch Einsatzkräfte vor Ort geschützt werden. In der Mehrzahl übernehmen diese Aufgabe die territorial zuständigen Kräfte. Dadurch ist absehbar, dass sich die Einsatzzeiten deutlich verlängern müssen. Im Schadensfall ist davon auszugehen, dass Brände das Vollbrandstadium bereits erreicht haben und bei Freisetzungen große Mengen an Schadstoffen vorhanden sind. In der Mehrzahl dieser Fälle sind dann die verfügbaren Einsatzkräfte nicht mehr in der Lage, die Situation zu beherrschen. Dies gilt insbesondere für die Fälle, bei denen Gefahrgüter beteiligt sind.
- ◆ Die zunehmende Dichte des Gütertransportes (HGV) und die Auslastung der Transportkapazitäten der Fahrzeuge werden auch bei den normalen brennbaren Stoffen (Holz, Kunststoffe, Gummireifen, Nahrungsmittel) den verfügbare Energieinhalt pro Fahrzeug weiter steigern. Bei durchschnittlich 28 t Ladung ergeben sich Energieinhalte zwischen 500 und 1300 GJ. Unter Berücksichtigung dieser Werte werden die HRR's auch beim Brand der normalen brennbaren Stoffe über den gegenwärtigen Grenzwert von 200 MW ([Ingason 2006]) hinaus ansteigen. Mit zunehmendem Anteil der HGV am Transportaufkommen in Tunneln steigt somit die Gefährdung auch ohne Zulassung des Transportes von Gefahrgütern.

Der Gewinn an Sicherheit durch den Einsatz aktiver Anlagen zur Brandkämpfung ist sowohl im Schutz der Personen, die den Tunnel nutzen, in der Erhaltung der wesentlichen Strukturen des Tunnels und seiner Nebenanlagen, der Erhaltung der Betriebsfähigkeit des Tunnels als auch in der Minderung der Größe und der Ausbreitung der Schadenslagen zu sehen.

Brandbekämpfungsanlagen (Lösch- und Brandunterdrückungsanlagen) können unmittelbar nach dem Ereignis in Betrieb genommen werden. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich das Ereignis noch im Entwicklungsstadium. Der Strom an Rauchgasen ist klein, aufgrund des noch geringen stofflichen Massenumsatzes. Eine Destratifikation der Rauchgase hat aufgrund geringer Massenströme noch keinen wesentlichen Einfluss auf die Sicht im Tunnel. Die Brandbekämpfungsanlagen erzielen bereits in der Anfangsphase des Brandes eine deutliche Kühlung der Umgebung, welche die Möglichkeiten der Brandausbreitung minimiert. Gleichzeitig erfolgt eine direkte Einflussnahme auf den Brandherd, die bei vollentwickelten Bränden zu Verringerungen der HRR um bis zu 80% betragen kann. Im Entwicklungsstadium kann dieser Wert aufgrund des Überschusses an Löschmittel innerhalb der Sektion noch gesteigert werden.

Wenn beim Unfall eines Gefahrguttransporters leichtentzündliche brennbare Flüssigkeiten in großer Menge vorhanden sind, wird die ausgelaufene Flüssigkeit auf der gesamten Leckfläche sofort zünden [McGrattan 2005]. Es kommt zu einem schnellen Anstieg der HRR auf der Fläche. Nach einer Entwicklungszeit erreicht die Brandentwicklung schließlich das Vollbrandstadium, welches in der Regel durch die Feuerwehren nicht beherrschbar ist. In diesen Fällen kann die stationäre Anlage durch Kühlung von Flächen und Minderung der Verbrennungsintensität dazu beitragen, dass sich der Lachenbrand nicht zu einem unbeherrschbaren Großbrand ausweitet. Die Entscheidungen zum Einsatz einer Löschanlage oder einer Brandunterdrückungsanlage in Tunneln sollten auch im Zusammenhang mit den verfügbaren Einsatzkräften gesehen werden.

Insbesondere in Tunneln mit großer Verkehrsdichte, aber auch in urbanen Tunneln mit hoher Gefährdung, sowie einer territorialen Feuerwehr mit begrenzten Kräften und Mitteln sollte eine

Löschanlage, die auch in der Lage ist, brennbare Flüssigkeiten sicher abzudecken, das Mittel der Wahl sein. Die Anlage sollte so ausgelegt sein, dass ihre maximale Einsatzdauer der anrückenden Feuerwehr die Entfaltung und Kontrolle eventueller verdeckter Brände oder heißer Flächen gestattet. Bis zu diesem Zeitraum muss die Anlage in Betrieb bleiben. Als Löschmittel sollte Löschwasser mit AFFF⁴-Zusätzen verwendet werden. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen können Situationen ähnlich den Offenegg-Tunnelversuchen ausgeschlossen werden. Es muss aber an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass Wasser ohne Zusätze nach einem Löscherfolg bei brennbaren Flüssigkeiten immer die Gefahr einer VCE in sich birgt, welche mit dem Einsatz filmbildender Schaummittelzusätze (AFFF) weitgehend ausgeschlossen wird.

Eine Brandunterdrückungsanlage kann in Tunneln mit hoher Gefährdung und dem Transport von Gefahrgütern eingesetzt werden, wenn die Einsatzkräfte schnell und mit ausreichenden Kräften und Mitteln vor Ort sein können und die Brandbekämpfung eigenständig realisieren können.

4.5 Mobile Löschwasserversorgung

Gemäß [Richtlinie EG 2004] müssen für die Versorgung der Tunnel mit Löschwasser in der Nähe der Tunnelportale und im Inneren der Tunnel im Abstand von maximal 250 m Hydranten vorhanden sein. Wenn keine Wasserversorgung vorhanden ist, muss zwingend geprüft werden, ob mit anderen Mitteln genügend Löschwasser bereitgestellt werden kann.

Die Abteilung für Straßennetze, Forschung, Sicherheit und Standards [ASTRA 19001 2008] der Schweiz legte fest, dass die zeitgerechte Versorgung mit Löschwasser für den Einsatz der Ereignisdienste sicherzustellen ist. Der Bedarf bezüglich Ort, Menge, Leistung und Druck ist in Zusammenarbeit mit den zuständigen Ereignisdiensten festzulegen.

Die [Richtlinie Eisenbahntunnel 2008] schreibt vor, dass für jedes Tunnelportal mit einem Rettungsplatz sowie für jeden Notausgang in einer Entfernung von höchstens 300 m ausreichend Löschwasser vorhanden sein muss (z.B. Gewässer, Tunnelentwässerung, Wasserversorgungsanlage, Löschwasserbehälter). Dabei muss eine Löschwassermenge von mindestens 96 m³ zur Verfügung stehen. Eine Förderleistung von mindestens 800 l/min muss sichergestellt sein. Damit kann die vorgesehene Förderleistung für 2 Stunden aufrecht erhalten werden. In zweigleisigen Tunneln sind durchgängige trockene Löschwasserleitungen zu verlegen. Sie müssen an den Portalen und von trockenen Zuführungsleitungen, die von den geländeseitigen Notausgängen aus zu verlegen sind, gespeist werden können. Bei zwei eingleisigen Tunneln einer zweigleisigen Strecke ist in jedem Fahrtunnel eine durchgängige trockene Löschwasserleitung zu verlegen. Die Löschwasserleitungen müssen an den Portalen gespeist werden können und mit den Trockenleitungen durch die Verbindungsbauwerke verbunden sein. Bei eingleisigen Tunneln eingleisiger Strecken sind die Löschwasserleitungen wie bei zweigleisigen Tunneln zu verlegen. Die Löschwasserleitungen in den Fahrtunneln müssen in Abständen von höchstens 125 m (analog zu 2.8.) Schlauchanschlusseinrichtungen (DIN 14461) haben.

Weitere Anforderungen sind:

- ◆ Die Löschwasserleitungen müssen abschnittsweise betrieben werden können.
- ◆ Sie sind in geschützter Lage zu verlegen.
- ◆ Die Förderleistung muss mindestens 800 l/min und der statische Druck in der Leitung 8 bar betragen. Der Fließdruck bei Entnahme von Löschwasser muss 5 bar betragen.

Durch das Konzept ortsfester Trockenleitungen und Zuführungen mit kurzen Abständen zwischen den Entnahmestellen lässt sich der zeitkritische Aufbau einer Schlauchleitung zum oder im Fahrtunnel vermeiden. Hinzu kommt, dass der Aufbau der Schlauchleitung entgegen der Fluchtrichtung erfolgen müsste, so dass Behinderungen nicht auszuschließen sind.

⁴ Tunnelbrände mit Gefahrgütern sind ebenso wie Brände brennbarer Flüssigkeiten in Großtanks nur schwer zu beherrschen. Hier ist gegenwärtig auf AFFF-Löschmittel nicht zu verzichten

Die [RABT 2006] fordert eine Löschwassermenge von 1200 l/min für Tunnel mit Längen über 400 m. Im Tunnel muss mindestens alle 150 m ein Hydrant vorhanden sein.

[Rhodes und MacDonald 2001] versuchen eine Antwort auf die Frage nach der erforderlichen Löschwassermenge für die Bekämpfung eines Brandes in Tunneln zu geben (Tabelle 29). Die Menge des Wassers, die benötigt wird, um ein Fahrzeugfeuer in einem Tunnel zu löschen, basiert auf den Erfahrungen der Brandbekämpfung in industriellen Gebäuden. Bei derartigen Bränden haben die Einsatzkräfte in der Regel einen direkten Zugang zum Brandherd. In diesem Kontext verweisen sie darauf, dass Fahrzeugfeuer besonders schwierig zu löschen sind, so dass die folgenden Vereinfachungen als ein absolutes Minimalerfordernis in Bezug auf die Wassermengen angesehen werden müssen.

Tabelle 29: Minimale Löschwasserströme zur Brandbekämpfung von Fahrzeugen

| Fahrzeugtyp | Brandfläche m ² | HRR MW | minimaler Löschwasserstrom l/min | Anzahl Strahlrohre mit 360 l/min Durchsatz |
|-------------|-------------------------------|--------|-------------------------------------|---|
| Pkw | 10 | 5 | 226 | 1 |
| Van | 35 | 15 | 462 | 2 |
| Truck | 200 | 100 | 1250 | 4 |

Um eine effiziente Brandbekämpfung durchführen zu können, muss das Wasser den Brandherd erreichen. Das ist besonders schwierig bei einem Fahrzeugbrand. Hierbei müssen die Feuerwehrleute nahe an das Fahrzeug herankommen. Der Löschwasserstrom muss für einen längeren Zeitraum in der Größenordnung gehalten werden, um einen Löscherfolg zu erzielen. Es kann etwa 30 Minuten dauern, in der wenigstens die in Tabelle 29 genannte Menge Löschwasser fließen muss, um ein Feuer in einem Lastwagen zu löschen. Obwohl Feuerwehrleute durch ihre Einsatzbekleidung und Ausrüstung gegen toxische Gase und hohe Temperaturen geschützt sind, können sie hohen Strahlungsdichten nicht für einen langen Zeitraum standhalten. Aus Versuchen haben [Rhodes und MacDonald 2001] abgeleitet, dass Feuerwehrleute einer Strahlungsdichte von 5 kW/m² für mindestens sieben Minuten standhalten können. Jedoch darf für eine Einsatzkraft bei einem Aufenthalt von 20 Minuten die Strahlungsdichte 2 kW/m² nicht übersteigen. Die Haupthindernisse, welche Feuerwehrleute davon abhalten, nahe an einen Brandherd heran zu kommen, sind die thermische Strahlung des Feuers und die gegen die Strömung gerichtete Ausbreitung der Brandgase (backlayering).

[Kohl et al. 2005] verweisen darauf, dass Brände in der Vollbrandphase mit hohen Energiefreisetzungsraten ein ernstes Problem für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr sein können. In ihrem Überblick zu verschiedenen Arbeiten wird deutlich, dass es häufig erhebliche Unterschiede zwischen den von Wissenschaftlern oft experimentell im Labormaßstab ermittelten Löschmittelmengen, die zum Teil erheblich niedrigere Werte ermittelten, und den aus statistischen Erhebungen realer Brände von der Feuerwehr eingesetzten Wassermengen gibt. Eine Überblicksarbeit von Davis wurde von den Autoren genutzt, um die wichtigsten internationalen Standpunkte zum Löschwasser mit den eigenen Arbeiten zu verbinden. Daraus entstand die Abbildung 34, in welche die am Institut der Feuerwehr aus statistischen Daten und Versuchen von [Pleiß und Kohl 1985] ermittelten Löschwasservolumenströme eingefügt wurden.

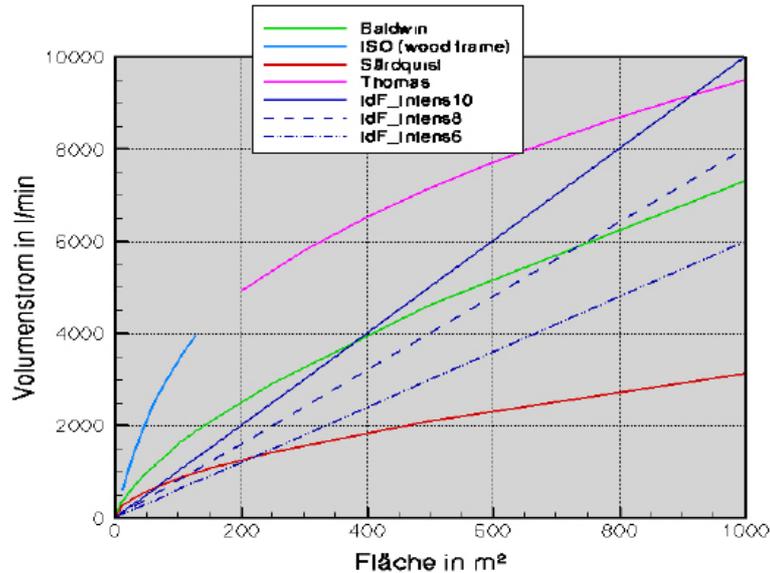


Abbildung 34: Erforderliche Löschwasservolumenströme als Funktion der Grundfläche

Die Funktionen nach Särqvist, der amerikanischen Versicherung (ISO) und Thomas stellen die oberen und unteren Grenzwerte dar. Die vereinfachten, linearen Kurven des Instituts der Feuerwehr liegen im mittleren Bereich, wobei im Bereich unter 200 m² eine Unterschätzung der erforderlichen Volumenströme auftritt. In der Tabelle 30 sind die dazugehörigen Funktionen angegeben, soweit sie aus der Literatur ermittelt werden konnten. Die Funktionen für die ersten drei Autoren wurden der Arbeit von [Davis 2000] entnommen.

Tabelle 30: Funktioneller Zusammenhang zwischen Brandfläche und Löschmittelvolumenstrom

| Autor | Brandfläche A m ² | Wasservolumenstrom V l min ⁻¹ |
|-----------------------------|---------------------------------|---|
| Thomas | > 200 | $V = 560 A^{0,41}$ |
| Baldwin | > 20 | $V = 74 A^{0,66}$ |
| Särqvist | 0,1 - 1000 | $V = 61 A^{0,57}$ |
| IdF- Vollstrahl | < 1000 | $V = 10 A^1$ |
| IdF- Sprühstrahl | < 1000 | $V = 8 A^1$ |
| IdF- Sprühstrahl-Netzmittel | < 1000 | $V = 6 A^1$ |

Aus diesen Zusammenhängen haben [Kohl et al. 2005] auf der Grundlage einer Arbeit von [Ingason et al 2001] Abschätzungen der benötigten Löschwasservolumenströme für einzelne Brandobjekte vorgenommen (Tabelle 31).

Tabelle 31: Wasservolumenströme beim Löschen

| Brandobjekt | Brandfläche A m ² | Energie- freisetzungsr MW | Wasser- volumenstrom V l min ⁻¹ | Strahlrohrzahl bei 360 l min ⁻¹ je Rohr |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|
| PKW | ca. 10 | 10 | 227 | 1 |
| Schwerlastkraft- fahrzeug | ca. 200 | 100 | 1250 - 4916 | 4-14 |
| Schwerlastkraft- fahrzeuganhänger | ca. 400 | 200 | 1856 - 6532 | 5-18 |
| Doppelstockbett aus Kiefernholz | ca. 4 | 5 | 134 | 1 |

Die Ähnlichkeiten in den ermittelten Daten sind zumindest für die Untergrenzen der Volumenströme bei Pkw und Lkw deutlich. Die in der Tabelle 30 ebenfalls angegebenen Obergrenzen der Volumenströme zeigen den möglichen Spielraum beim Löschwasservolumenstrom.

[Grimwood 2005] versuchte über die Energiebilanzen der Brände und die Effizienz des Löschwassers eine einfache Abschätzung für den Löschwasserbedarf. Grundlage für seine Betrachtung sind die Arbeiten von Nelson und Royer (Iowa State University). Im Ergebnis seiner Betrachtungsweise geht er davon aus, dass in geschlossenen kleinen Räumen etwa 50 % des Energieaufnahmevermögens des Löschwassers für einen Löscherfolg nutzbar ist. Somit werden durch einen Löschwasserstrom von 1 kg/s ungefähr 1,3 MW Brandleistung aufgenommen. Diese Abschätzung würde für einen 10 MW Brand einen Löschwasservolumenstrom von 7,7 l/s oder 462 l/min ergeben.

In ihren eigenen Arbeiten zeigten [Pleß und Kohl 1985], insbesondere durch Auswertung von kleineren und großen Löschversuchen, dass die gewählte flächenbezogene Anwendungsrate des Löschwassers bei vergleichbaren Bränden eine Funktion der Löschzeit ist, welche die Form einer Hyperbel besitzt. Bei hohen Anwendungsraten wird die Löschzeit sehr kurz und strebt gegen Null. Dementsprechend ergeben geringe Anwendungsraten hohe Löschzeiten, die im Extremfall nicht mehr zum Löscherfolg führen. Die hieraus resultierende Kurve ist schematisch in der Abbildung 35 dargestellt.

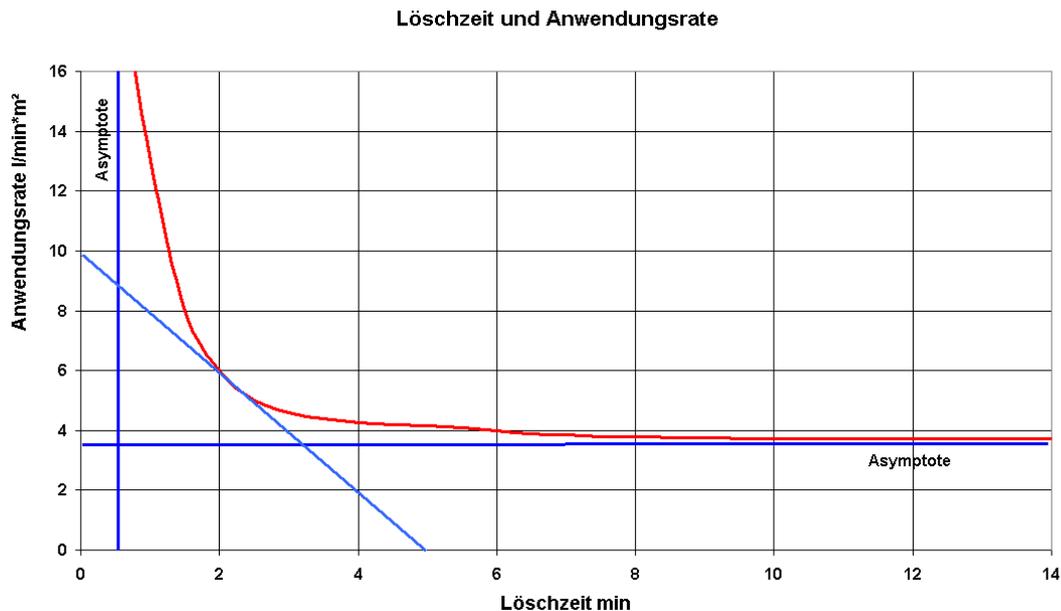


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Abhängigkeit von Löschzeit und Anwendungsrate

Die grafische Darstellung lässt erkennen, dass der flächenbezogene Löschmittelvolumenstrom (Anwendungsrate) direkt proportional zur Löschzeit ist. Bei hohen Anwendungsraten kann praktisch kaum noch ein Zeitgewinn beim Löschen erzielt werden, während niedrige Anwendungsraten keinen Löscherfolg mehr gewährleisten. Bildet man das Produkt aus Anwendungsrate und Löschzeit, dann erhält man den flächenbezogenen Gesamtverbrauch an Löschmittel. Wird dieser Gesamtverbrauch als Funktion der Löschzeit dargestellt, so ergibt sich ein Kurvenverlauf gemäß Abbildung 36.

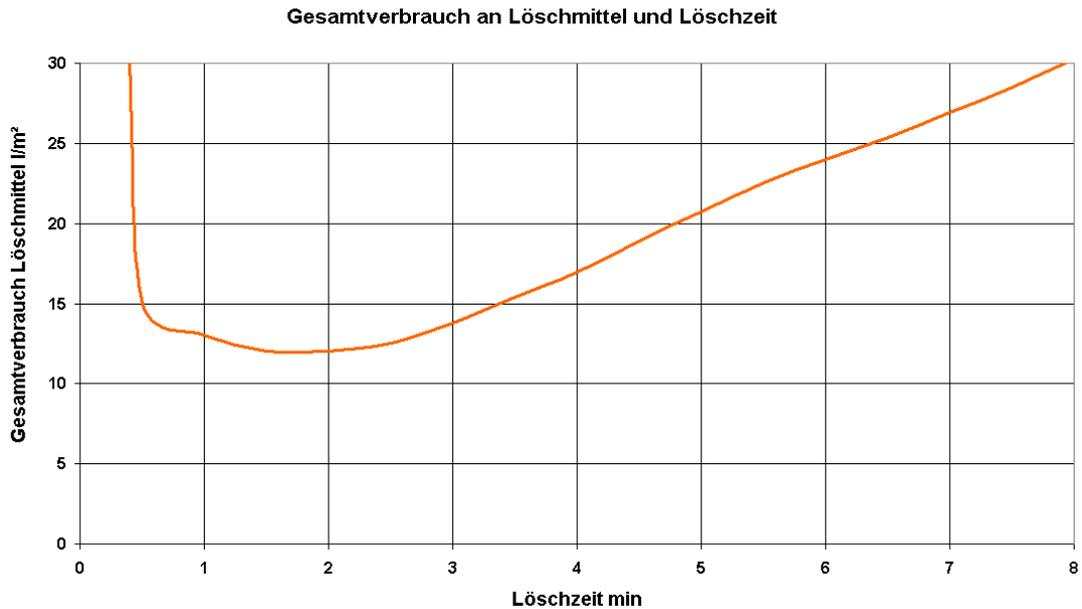


Abbildung 36: Schematische Darstellung der Abhängigkeit des Löschmittelgesamtverbrauchs von der Löschzeit

Aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 36 wird deutlich, dass es bei jeder Brandbekämpfung einen optimalen Bereich der Anwendungsrate gibt, innerhalb dessen ein Minimum an Wasser zum Löschen eines Brandobjektes erforderlich ist. Diese Aussage gilt immer dann, wenn die Löschtaktik und die Randbedingungen des Löschens vergleichbar sind. Es ist allerdings leicht zu erkennen, dass sich in Bereichen ansteigenden Gesamtverbrauchs jede Randbedingung und jedes taktische Fehlverhalten entscheidend auf den Gesamtverbrauch und damit auch auf die Effizienz des Löscherfolges auswirkt. Bei hohen Anwendungsraten wird in diesen Fällen das Löschwasser nicht mehr effizient genutzt und vergrößert den Wasserschaden, während bei geringen Anwendungsraten der Löscherfolg ausbleiben wird.

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen sehr deutlich, dass die Anwendungsrate des Löschwassers unbedingt innerhalb eines optimalen Bereichs liegen sollte. Es wurde herausgefunden, dass dieser optimale Bereich der Anwendungsraten für Löschwasser mit unterschiedlicher Verteilung und Netzmittelzusätzen (Schaummittel) in einer Größenordnung von 6 bis 10 l/min m² liegt. Eine Übersicht ist in der Tabelle 32 gegeben. Der Vollständigkeit halber wurden in dieser Tabelle auch die Anwendungsraten für Schäume bei der Brandbekämpfung brennbarer Flüssigkeiten aufgenommen.

Tabelle 32: Anwendungsdaten für Löschwasser

| Stoff | Anwendungsdaten für Wasser und Schaum l/min*m ² | | | | | | | |
|-----------------------|--|-----|--------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|---|-----|
| | Vollstrahl | | | | Sprühstrahl | | | |
| | Wasser | | Netzwasser | | Wasser | | Netzwasser | |
| fest, glutbildend | 10 | | 8 | | 8 | | 6 | |
| fest, schmelzend | 8 | | 6 | | 6 | | 4 | |
| | Schwerschaum l/min*m ² | | Mittelschaum l/min*m ² | | Leichtschaum l/min*m ² | | Sprühschaum aus Sprühstrahlrohren ⁵ l/min*m ² | |
| | AFFF | MBS | AFFF | MBS | AFFF | MBS | AFFF | MBS |
| Brennbare Flüssigkeit | 4-6 | | 8 | | 4-6 | | 6 | |
| | - | | - | | 4-6 | | - | |

⁵ Die Anwendung bedingt grundsätzlich AFFF Schaummittel

Spätere Arbeiten von [Pleß und Seliger 2000] zeigten allerdings, dass diese Raten nur dann ausreichend sind, wenn die an der Verbrennung beteiligten Oberflächen der brennbaren Stoffe sicher mit Löschwasser beaufschlagt werden können. Im Fall verdeckter Oberflächen, Bränden in Kanälen oder ähnlichen Situationen steigen die Anwendungsraten sprunghaft an, wenn die verdeckten Flächen nicht zu erreichen sind. In einigen Fällen locker gelagerter Materialien kann der Löscherfolg auch ausbleiben, weil das Löschwasser, ohne das Ziel (die Oberflächen) zu erreichen, nutzlos abfließt.

Brände in Tunneln sind in der Mehrzahl der Fälle nur von der Luvseite, bezogen auf die Luftströmung im Tunnel, durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr zu erreichen. Da sich die Brandherde in der Regel in Längsrichtung zur Luftströmung ausdehnen, können die Einsatzkräfte nur die Schmalseite des Brandherdes einsehen. Deshalb können auch nicht alle am Brand beteiligten Oberflächen gezielt mit Löschwasser beaufschlagt werden. Vorteilhaft ist dagegen, dass Tunnel einen vergleichsweise geringen Querschnitt aufweisen, der sehr leicht durch die verfügbaren Strahlrohre mit einem vollständig abdeckenden Sprühstrahl beaufschlagt werden kann, so dass man indirekt den wesentlichen Anteil aller am Brand beteiligten Oberflächen erreichen kann. Trotzdem sollten die dargestellten unteren Grenzwerte der Anwendungsraten als die absoluten Untergrenzen für Löschwasservolumenströme zur Brandbekämpfung in Tunneln angesehen werden.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Brandbekämpfung, insbesondere im Bereich kleinerer sich entwickelnder Brände, resultiert aus dem Gesichtspunkt des Schutzes der Einsatzkräfte unmittelbar am Brandherd. Es ist schwierig einzuschätzen, in welchem Entwicklungsstadium sich ein Brand befindet. Insbesondere bei Bränden in Tunneln, deren Verbrennungsregime Industrieöfen sehr nahe kommen, können sich durch Veränderungen der Umgebungsbedingungen sowohl die Richtung der Rauchgase verändern (backlayering), als auch teilweise Explosionen auftreten (VCE). Für diese Situationen müssen die Einsatzkräfte ausreichend aktiven Schutz haben, den sie in Form des Löschwassers mit sich führen. Aufgrund der Konstitution eines Menschen kann dieser unter schwierigen Bedingungen einen Rückstoß von 150 N sicher beherrschen. Nach [Schneegaß 2008] wird dieser ergonomische Grenzwert durch Sprühstrahlrohre bei Volumenströmen von etwa 400 l/min erreicht. Deshalb sollten Einsatzkräfte grundsätzlich, auch bei kleinen sich entwickelnden Bränden, Volumenströme von etwa 400 l/min als aktive Sicherheit zum persönlichen Schutz mit sich führen. Die tatsächlich einzusetzenden Volumenströme werden durch die Einsatzkräfte vor Ort bestimmt. Damit dürfte auch die in Abbildung 34 erkennbare Unterschätzung der Löschwasservolumenströme durch den Ansatz des IdF im Bereich bis etwa 200 m² weitgehend beseitigt sein, weil aus Sicherheitsgründen real nie weniger als 400 l/min verfügbarer Volumenstrom eingesetzt werden sollte.

Die Volumenströme an Löschwasser von 1200 l/min, die nach [RABT 2006] zur Brandbekämpfung in Tunneln verfügbar sein müssen, ermöglichen sowohl bei Bränden von Feststoffen (Gefahrgüter und Heavy Goods) als auch von Flüssigkeiten, nur eine begrenzte Ausdehnung eines Brandes zu bekämpfen. Legt man die in Tabelle 32 angegebenen Anwendungsraten zugrunde, so ergeben sich folgende maximale Brandflächen:

- ◆ bei brennbaren festen Stoffen zwischen 120 m² und 200 m²
- ◆ bei brennbaren Flüssigkeiten zwischen 150 m² und 300 m²

Damit wird deutlich, dass bereits bei mehreren Lkw die Leistungsgrenze der Feuerwehr durch den verfügbaren Löschmittel-Volumenstrom erreicht wird. Brände größerer Ausdehnung erfordern immer die Nachführung ausreichender Volumenströme an Löschwasser.

Eine weitere Randbedingung der Brandbekämpfung ist die Erreichbarkeit des gesamten Brandherdes durch das Löschmittel. Der Löschangriff kann in Tunneln aus Sicherheitsgründen und aus Gründen der Belastung der Einsatzkräfte durch die freiwerdenden Energie- und Rauchgasmassenströme ausschließlich von der Luvseite des Brandes in Strömungsrichtung (upstream) ausgeführt werden. Die verfügbaren Strahlrohre erreichen Wurfweiten zwischen 25 m und maximal 40 m, je nach Strahlart und Löschmitteldurchsatz.

Bei Bränden auftretende Strahlungswerte, die sich aus dem Strahlungsgesetz bei vollständiger Emission ($\varepsilon = 1$) an der Flammengrenze ergeben, betragen bei 1000 °C bereits 149 kW/m². Diese Werte werden bei leuchtenden Flammen schon bei Schichtdicken ab 0,1 bis 0,2 m erreicht. Die Brandbekämpfung ist deshalb aus Entfernungen von 20 m bis 25 m zu beginnen, um den Wasserstrahl gleichzeitig auch als Strahlungsschutz für die Einsatzkräfte zu nutzen. Eine ausreichende Absorption der Wärmestrahlung ist allerdings nur bei guter Verteilung der Wassertropfen möglich. Diese Verteilung wird aber nur bei der Verwendung von Sprühstrahlen erreicht, welche aber bei Volumenströmen von etwa 1000 l/min nur noch Wurfweiten zwischen 13 m und 18 m haben. Damit kann zwar der vordere Flammensaum erreicht werden, eine Brandbekämpfung in der Tiefe ist aber nicht möglich. Um beide Faktoren – Strahlungsschutz und Reichweite – zu realisieren, muss ein Teil des Löschwassers zum Schutz vor Wärmestrahlung genutzt werden und das verbleibende Löschwasser zur Brandbekämpfung.

Sprühstrahlen mit ausreichender Tropfendichte und Wurfweite werden bei Drücken von etwa 8 bar und Volumenströmen von 400 l/min erzielt. Die Wurfweite beträgt dann etwa 10 m bis 13 m. Damit bleibt für die Brandbekämpfung ein Volumenstrom von 800 l/min übrig, wenn man von der [RABT 2006] ausgeht. Dieser Volumenstrom reicht unter der Maßgabe weitreichender Strahlen für die Brandbekämpfung an Feststoffen für Brandflächen bis etwa 100 m². Damit würde er ausreichen für die Bekämpfung eines HGV-Brandes, selbst bei einer Löschtiefe bis 28 m. Es muss dann aber der noch verfügbare Volumenstrom von 800 l/min mit einem Strahlrohr ausgebracht werden, um den notwendigen Anfangsimpuls für die größere Wurfweite zu erhalten. In der Anfangsphase muss aus größerer Entfernung ein Sprühstrahl mit geringem Öffnungswinkel bzw. Vollstrahl eingesetzt werden, der die notwendige Wurfweite erreicht. Mit zunehmendem Löscherfolg und damit Annäherung an den Brandherd kann der Öffnungswinkel des Strahls soweit vergrößert werden, dass das Löschwasser optimal über den Brandherd verteilt werden kann.

Sind allerdings mehrere Fahrzeuge in den Brand involviert, wird die Reichweite der Löschmittelstrahlen das bestimmende Moment und es wird ohne ein sicheres Ablöschen der erreichbaren Brandflächen nur schwer möglich sein, den Brand in der Tiefe zu bekämpfen oder eine weitere Ausbreitung zu verhindern.

Das Fazit dieser Überlegungen ist:

- ◆ Der nach [RABT 2006] verfügbare Volumenstrom ermöglicht den Feuerwehren, einen begrenzten Vollbrand der Größenordnung eines HGV gezielt zu bekämpfen. Es darf allerdings keine Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge mehr erfolgen, weil dann sowohl die Wurfweiten der Strahlrohre als auch die verfügbaren Volumenströme an Löschmittel nicht mehr ausreichend sind.
- ◆ Die Brandbekämpfung muss zeitnah zur Zündung begonnen werden, um Brandausbreitungen nach Möglichkeit auszuschließen.
- ◆ Jede Bekämpfung eines Brandes, bei dem Lkw beteiligt sind, sollte mit der maximal verfügbaren Löschwassermenge begonnen werden. Der nachträgliche Aufbau einer ausreichenden Wasserversorgung bedeutet Zeitverlust und damit die Minderung der Chancen einer erfolgreichen Brandbekämpfung.
- ◆ Das Löschwasser muss den Schutz der Einsatzkräfte vor Wärmestrahlung gewährleisten und für die Brandbekämpfung ausreichend sein. Mindestens $\frac{1}{3}$ des verfügbaren Löschwassers wird für den Strahlungsschutz benötigt.
- ◆ Die Brandbekämpfung kann nur mit Strahlrohren effektiv ausgeführt werden, die ausreichende Wurfweiten besitzen. Es sollten maximal zwei Trupps für die unmittelbare Brandbekämpfung eingesetzt werden.
- ◆ Alle Einsatzkräfte vor Ort sollten ausreichend vor Wärmestrahlung geschützt sein. Hilfsgeräte und Sonderausrüstung zum Strahlungsschutz sind empfehlenswert.

- ◆ Der Strahlungsschutz durch Löschwasser muss nicht unbedingt durch einen Löschrupp gewährleistet werden. Er kann auch durch ein automatisch arbeitendes Sprühstrahlrohr realisiert werden, dessen Sprühstrahl allerdings zur optimalen Strahlungsabsorption eingerichtet und überwacht werden muss.
- ◆ Kleinere Brände, z. B. mit Pkw, sollten nicht unterschätzt werden, insbesondere wenn mehrere Fahrzeuge beteiligt sind, weil auch hier bei Brandentwicklungszeiten von 10 bis 15 Minuten die Gefahr einer weiteren Brandausbreitung nicht auszuschließen ist.

4.6 Sonstige Löschgeräte

In Tunneln werden generell an den Halteboxen und an weiteren exponierten Stellen Löschgeräte für die Bekämpfung von Entstehungsbränden deponiert. Diese Geräte dienen ausschließlich der Bekämpfung von Bränden unmittelbar nach dem Ereignis durch Tunnelnutzer. Im wesentlichen werden an diesen Stellen Handfeuerlöscher deponiert. In einigen Fällen werden auch Wandhydranten installiert, die eine komplette C-Schlauchleitung mit Strahlrohr enthalten, welche bei Entnahme automatisch betriebsbereit ist. Einige dieser Wandhydranten liefern direkt eine Schaummittellösung, welche auch zur Brandbekämpfung brennbarer Flüssigkeiten geeignet ist. Allerdings sollte dabei bedacht werden, dass ungeübte Personen nur kleine Brände sicher beherrschen können. Die verfügbaren Löschgeräte werden damit ausschließlich für den Fall eines Entstehungsbrandes vorgehalten. Sie sind für größere Unfälle mit Brandfolge nicht vorgesehen und auch nicht geeignet.

4.7 Schutzausrüstung für Einsatzkräfte

Einsätze in Tunneln erfordern einen maximalen Schutz aller Einsatzkräfte, sowohl mit persönlicher Schutzausrüstung und Atemschutz als auch mit speziellen Schutzmitteln gegen Wärmestrahlung und Chemikalien.

Unfällen mit Personenschäden und eingeklemmten Personen im Unfallfahrzeug ist aufgrund der eingeschränkten Bewegungsfreiheit in Tunneln deutlich schwieriger zu begegnen als auf offenen Straßen. Die verfügbare Technik muss schnell und effizient einsetzbar und auch für große Fahrzeuge geeignet sein. Es muss berücksichtigt werden, dass Folgeereignisse, wie das Auslaufen brennbarer Flüssigkeiten oder die Freisetzung von Flüssiggasen möglich sind, denen Maßnahmen der Konsequenzminderung entgegengesetzt werden müssen. Freisetzungen toxischer Gase und Dämpfe erfordern effektiven Atemschutz und speziellen Körperschutz. Da in Tunneln die Ausbreitung der toxischen Stoffe nur in Strömungsrichtung erfolgt und die Verdünnung der Stoffe deshalb vom verfügbaren Luftstrom abhängig ist, kann die Zeit der Kontamination deutlich verlängert werden.

Brände sind gekennzeichnet durch schnellen Temperaturanstieg auf Werte bis 1200 °C und teilweise noch höher. Leuchtende Flammen erreichen bereits bei geringer Schichtdicke ihre maximale Strahlungsemission, so dass die von der Flammenfront abgestrahlte Energie dem Maximalwert der Strahlung bei dieser Temperatur entspricht. Die Wärmestrahlung wird an den Tunnelwänden, sowie an stehenden Fahrzeugen absorbiert werden. Das führt auch zur schnellen Erwärmung der unmittelbaren Umgebung des Brandes. Damit werden die Einsatzkräfte mit erhöhten Raumtemperaturen und der Wärmestrahlung der Flamme konfrontiert. Deshalb ist einerseits ein Schutz gegen Wärmestrahlung erforderlich und andererseits eine ausreichende Wärmeisolation der Schutzkleidung. Die Wärmeisolation kann aber nicht verhindern, dass die Einsatzkräfte nach einer gewissen, von der Umgebungstemperatur und der Wärmestrahlung abhängigen Einsatzzeit, steigende Körperkerntemperaturen erreichen. Sie müssen deshalb abgelöst werden.

Der Atemschutz ist bei Bränden ein wichtiger Bestandteil des persönlichen Schutzes. Sofern das Löschfahrzeug nicht in einem gesicherten Bereich stationiert ist, z.B. in der zweiten Röhre des Tunnels oder luvseitig bei ausreichender Strömung und Überwachung der Gaskonzentration müssen auch Maschinisten und andere Einsatzkräfte Atemschutz tragen.

4.8 Weitere technische Mittel

In Tunneln wird die Verständigung per Funk durch spezielle Antennen, die sich im Tunnel und an den Portalen befinden, gewährleistet. Damit können die Feuerwehren im Einsatzfall ihre Kommunikation vor Ort mit den eigenen Funkgeräten problemlos abwickeln.

Die Nutzer von Tunneln können in dessen Innenraum in den meisten Fällen die örtlich einfallenden Radiosender oder eine spezielle Radiofrequenz, auf die am Tunneleingang hingewiesen wird, empfangen. Über diese Sender / Frequenz werden die Anweisungen der Tunnelleitzentrale weitergegeben, so dass bei eventuellen Unfällen jeder Tunnelnutzer sicher erreicht werden kann. Die Informationen werden außerdem über Lautsprecher im Tunnel verbreitet.

Weiteres Hilfsmittel sind die Notbeleuchtung und die Beschilderung des Tunnels. Die Notbeleuchtung ist darauf ausgerichtet, dass die Tunnelnutzer auch in einem verqualmten Tunnel die Notausgänge bzw. -übergänge erreichen können. Für die Feuerwehren kann die Notbeleuchtung ein wichtiges Hilfsmittel zu Orientierung und vor allem zur Abschätzung der Brandausdehnung sein.

5 Szenarien für die Feuerwehren bei Unfällen in Tunneln

5.1 Ereignisse und Folgeszenarien für die Feuerwehren

Jeder schwere Verkehrsunfall stellt eine Gefahr für das Leben von Menschen dar und besitzt ein Gefährdungspotential bis hin zur Entwicklung eines Brandes, einer Explosion oder zur Freisetzung von Gefahrgütern, in einigen Fällen mit toxischer Wirkung. Aus diesen Gründen heraus ist das Szenario mit der geringsten unmittelbaren Gefahr, aber mit einem entsprechenden Gefahrenpotential, der Verkehrsunfall.

Dem Verkehrsunfall nachgeordnet schließt sich die Freisetzung von Stoffen aus dem Fahrzeug an. Grundsätzlich wird es in diesem Szenario entsprechende Abstufungen geben, weil die Freisetzung von Stoffen nur aus dem in den Fahrzeugen mitgeführten Vorrat an Stoffen erfolgen kann. Zunächst besitzen alle Fahrzeuge einen bestimmten Vorrat an brennbaren Flüssigkeiten als Treibstoff, der u. U. eine wesentliche Rolle spielen kann.

Transportfahrzeuge für Flüssigkeiten und Gase besitzen dagegen ein Freisetzungspotential, welches insbesondere bei toxischen und brennbaren Stoffen zu berücksichtigen ist. Gase werden häufig unter Druck in Stahlflaschen oder Druckgefäßen als Flüssiggas oder als komprimiertes Gas transportiert bzw. es können auch Transporte tiefkalter verflüssigter Gase vorgenommen werden. Bei diesen unterschiedlichen Randbedingungen sind die Freisetzungen der Gase jeweils unterschiedlich, so dass sich auch unterschiedliche Szenarien entwickeln können.

Im Fall der Freisetzung mit unmittelbar darauf folgender Zündung der Stoffe kann es zu Bränden oder Explosionen kommen, die ebenfalls unterschiedlichen Randbedingungen ausgesetzt sind, welche die Intensität des Brandes oder der Explosion bestimmen.

Durch technisches Versagen oder durch Reaktionen brennbarer Stoffe können Brände entstehen, ohne dass ein Unfall die Primärursache darstellt. Aus diesen Szenarien ergeben sich insbesondere Brandszenarien brennbaren fester Stoffe, die normalerweise keine Gefahr darstellen, wie zum Beispiel Transporte von Holz, Kunststoffen, Nahrungsmittel usw.. Aber auch durch gezielte Brandstiftung bzw. Auslösung von Explosionen können sich Szenarien für die Feuerwehr entwickeln. Die Tabelle 33 zeigt die für die Feuerwehr relevanten Einsatzszenarien.

Tabelle 33: Einsatzszenarien der Feuerwehr

| Primärereignis | Folgeereignis | Folgeereignis | Folgeereignis | Einsatzszenario |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------|---|
| Verkehrsunfall | kein Personenschaden | | | ohne |
| | Personenschaden | | | Hilfeleistung |
| | Freisetzung Gas | toxische Gaswolke | | Verdünnen, Niederschlagen |
| | | brennbare Gaswolke | Explosion | ohne, Nachsorge |
| | | | Brand | Gasbrand |
| | | | Explosion und Brand | Gasbrand |
| | | | | |
| | Freisetzung Flüssigkeit | Flüssigkeitslache, toxisch | | Aufnehmen, Entsorgen |
| | | | Brand | Brandbekämpfung, brennbare Flüssigkeit |
| | | | VCE mit Brand | Brandbekämpfung, brennbare Flüssigkeit |
| | | | Brand | Brandbekämpfung, Feststoffe |
| | | | Explosion | ohne |
| technisches Versagen | Zündung Feststoffe | | Brand | Brandbekämpfung, Feststoffe |
| | Zündung Flüssigkeiten | | Brand | Brandbekämpfung, brennbare Flüssigkeiten |
| Brandstiftung, Terrorismus | Freisetzung toxischer Stoffe | | | Dekontamination |
| | Explosion | | | ohne, Nachsorge |
| | Brand | | | Brandbekämpfung brennbare Flüssigkeiten, Feststoffe, Gase |

Für die Feuerwehr resultierende Einsatzszenarien sind somit beschränkt auf drei grundsätzliche Szenarien:

- ◆ Hilfeleistung bei schweren Verkehrsunfällen,
- ◆ Beseitigung und Nachsorge bei Freisetzungen gefährlicher Stoffe,
- ◆ Bekämpfung von Bränden.

Natürlich sind bei den unterschiedlichen Szenarien unterschiedliche Größen und Intensitäten zu berücksichtigen. Allgemein kann im Hinblick auf Größe und Intensität eines Einsatzszenarios lückenlos die gesamte Palette von sehr kleinen Ereignissen bis zu Großereignissen erwartet werden. Es ist deshalb angeraten, jedes Szenario in drei Stufen von klein, mittel bis groß zu unterteilen. Diese Stufung steht in Übereinstimmung mit den quantitativen Risikoanalysen für die Beurteilung der Risiken in konkreten Tunneln, wie sie von [Persson 2002] beschrieben wurde.

Bei Bränden sind aus Sicht der unterschiedlichen Maßnahmen zur Brandbekämpfung die unterschiedlichen Aggregatzustände der brennbaren Stoffe zu berücksichtigen. Da allerdings in der Praxis immer mehrere Stoffe, auch mit unterschiedlichen Aggregatzuständen, vorhanden sind, werden Stoffe mit geringerem Massenanteil unberücksichtigt gelassen. So ergeben sich insgesamt 12 verschiedene Einsatzszenarien, bei denen an 9 Szenarien Gefahrgüter beteiligt sind. Bei den meisten Szenarien werden schließlich noch bestimmte Randbedingungen berücksichtigt (siehe Arbeitsvorschriften), die allerdings nicht zur weiteren Untergliederung der Einsatzszenarien führen.

5.2 Beschreibung der Einsatzszenarien

5.2.1 Unfallszenarien

In diese Gruppe fallen alle Unfälle in Tunneln, die keine Folgeereignisse nach sich ziehen.

◆ Unfallszenario 1

Der Unfall ereignet sich durch einen oder zwischen zwei Personenkraftwagen. Im Ergebnis des Ereignisses können Personen verletzt, eingeklemmt oder eingequetscht sein. Die Hilfeleistung bezieht sich auf die Erstversorgung einer oder mehrerer Personen, die Bergung der Verletzten und die Befreiung von Personen.

Durch den Unfall kann der Tank aufgerissen sein und Benzin wird als Lache freigesetzt. Gleichzeitig kann auch Propangas als Fahrzeugtreibstoff austreten, ohne zu zünden.

◆ Unfallszenario 2

Der Unfall geschieht zwischen zwei Lkw oder einem Lkw und einem Pkw. Im Ergebnis sind mehrere Personen eingeklemmt oder eingequetscht. Die Verletzungen sind ernst. Die Hilfeleistung bezieht sich auf die Bergung der Personen und ihre Erstversorgung.

Durch den Unfall ist der Tank des Lkw beschädigt und die brennbare Flüssigkeit bildet eine Lache auf der Fahrbahn. Teile der Ladung sind heruntergefallen und könnten gefährliche Stoffe freisetzen.

◆ Unfallszenario 3

Der Unfall geschieht zwischen einem Bus und einem Lkw. Im Ergebnis sind eine Vielzahl von Verletzten und Schwerverletzten vorhanden. Mehrere Personen können sich nicht bewegen. Einige Personen sind eingeklemmt. Die Hilfeleistung bezieht sich auf die Bergung der Personen aus den Fahrzeugen und die Erstversorgung.

Durch den Unfall ist der Tank des Busses in Mitleidenschaft gezogen. Eine Flüssigkeitslache befindet sich unter dem Bus. Im Bereich des Lkw tritt ebenfalls Flüssigkeit aus, wobei dessen Tank aber unbeschädigt ist, so dass es sich hier um Brems-, Hydraulik- oder Kühlflüssigkeit handeln kann. Die Ladung des Lkw ist auf die Fahrbahn gefallen und die Verpackung wurde teilweise zerstört. Flüssige Stoffe sind nicht erkennbar.

Für das kleine und mittlere Unfallszenario (1 und 2) sind die Kräfte einer Feuerwehr ausreichend und das Equipment so gewählt, dass diese Aufgaben gelöst werden können. Es ist allerdings abzuwägen, ob alle Aufgaben, die teilweise parallel ausgeführt werden müssen, im Einzelfall nicht zusätzliche Einsatzkräfte erfordern.

Das Unfallszenario 3 dürfte die Kräfte und Mittel einer Feuerwehr bereits übersteigen, so dass zusätzliche Einsatzkräfte nachgefordert werden müssen. Insbesondere zur Versorgung der verletzten Personen müssen ausreichend Kräfte nachgefordert werden.

5.2.2 Freisetzungsszenarien

In diese Gruppe fallen alle Szenarien, bei denen nach einem Unfall als Folgeereignis ein volatiler Stoff freigesetzt wird und dieser sich im Tunnel ausbreitet. Die freigesetzten Stoffe sind in allen Fällen als Gefahrgut einzuordnen.

◆ Freisetzungsszenario 1

Nach einem Unfall wird aus einem definierten Leck ein volatiler Stoff freigesetzt, welcher sich ohne weitere Folgereaktionen ausbreitet. Die Freisetzungsrates beträgt 4 l/min und die Gesamtmasse maximal 100 kg. Der Stoff kann ein unter Druck stehendes brennbares Gas, ein nichtbrennbares aber toxisches Gas, eine brennbare, leichtsiedende Flüssigkeit oder eine toxische Flüssigkeit sein. Kombinationen der Eigenschaften bei Gasen oder Flüssigkeiten sind möglich. Der Einsatz bezieht sich auf die Eindämmung des Lecks, die Beseitigung der toxischen oder explosiblen Konzentration.

Es muss beachtet werden, dass die Strahlventilatoren sowie die übrige technische Ausstattung in der Mehrzahl keinen Explosionsschutz besitzen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Grenzkonzentrationen für toxische Verbindungen meist um ein bis zwei Zehnerpotenzen niedriger sind als die der zündfähigen Gemische. Bei den Arbeiten ist der Explosionsschutz vor Ort sicherzustellen, bevor das Leck abgedichtet wird.

◆ **Freisetzungsszenario 2**

Nach einem Unfall ist ein großes Leck entstanden, aus dem flüssiges Gas oder volatile Flüssigkeit austritt. Die Freisetzungsrates beträgt anfänglich etwa 40 l/min und die Gesamtmasse 5000 kg. Zum Austritt aus dem Leck kommt eine Lachenverdampfung und in der Anfangsphase eine Flashverdampfung der Flüssigkeitslache hinzu. Der Siedepunkt des Flüssiggases liegt im Minustemperaturbereich. Sowohl das Gas als auch die Flüssigkeit können toxisch, brennbar oder beides sein.

Der Einsatz bezieht sich auf die Sicherung der Unfallstelle, die Beseitigung der Gefährdung durch Abführen der gefährlichen Konzentrationen bis unterhalb der Grenzwerte, sowie das Abdichten des Lecks. Es ist zu beachten, dass die Sicherung der Einsatzstelle Vorrang besitzt und erst nach Eintreffen der erforderlichen Technik Maßnahmen zur Konsequenzminderung eingeleitet werden können.

◆ **Freisetzungsszenario 3**

Nach einem Unfall wird die gesamte Ladung des Transportfahrzeuges freigesetzt. Der Gas- oder Flüssigkeitstank kollabiert. Es kommt bei Flüssiggasen zu einer Flashverdampfung in der Anfangsphase, in der je nach Siedetemperatur der Flüssiggase bei Normaldruck 30 bis 50 % der freigesetzten Menge schlagartig verdampfen. Daran anschließend erfolgt die Lachenverdampfung der siedenden Flüssigkeit. Bei Flüssigkeiten bildet sich eine Lache aus. Die Verdampfungsrates der Lache richtet sich nach dem Siedepunkt der Flüssigkeit, der Lachengröße und der Windgeschwindigkeit im Tunnel. Sowohl das Gas als auch die Flüssigkeit können toxisch, brennbar oder beides sein.

Der Einsatz bezieht sich auf die Sicherung der Einsatzstelle, die Verhinderung von Folgeschäden, Maßnahmen der Konsequenzminderung, Information der Bevölkerung und Maßnahmen der Evakuierung. Besondere Schwerpunkte sind die Verhinderung von Explosionen und der Ausbreitung von Schwergaswolken sowie die Verdünnung der Gase bis unterhalb der Grenzwerte.

Alle Freisetzungsszenarien haben das Potential, Folgereaktionen auszulösen. Im Fall des kleinen Szenarios ist die Wahrscheinlichkeit einer Explosion des Gas / Luft-Gemisches und die toxische Wirkung der sich ausbreitenden Gaswolke auf einen relativ kleinen Raum begrenzt. Es besteht die Möglichkeit durch Maßnahmen der Feuerwehr, zumindest im Leckbereich eine ausreichende Sicherheit zu schaffen und die Leckstelle abzudichten. Da die Leckstelle nur eine endliche Zeit Flüssigkeit oder Gas freisetzt, gelten für diese Maßnahmen enge zeitliche Grenzen. Die Verdünnung und Entfernung des Gases aus dem Bauwerk bzw. die Abdeckung und Aufnahme der Flüssigkeit kann mit den Geräten der Feuerwehr realisiert werden. Allerdings gehören derartige Spezialgeräte nicht zur Normalausstattung der Feuerwehrfahrzeuge. Für Feuerwehren, in deren Ausrückebereich sich Tunnelanlagen befinden, in denen derartige Szenarien denkbar sind, muss eine solche Ausrüstung zeitnah verfügbar sein.

Das mittlere Freisetzungsszenario erfordert bereits zusätzliche Kräfte, weil die Gaswolke auch außerhalb des Bauwerkes noch gefährlich sein wird und an dem Portal in Strömungsrichtung zusätzliche Maßnahmen der Konsequenzminderung realisiert werden müssen. Im Fall der volatilen Flüssigkeiten kann dieses Szenario mit den Kräften mehrerer Feuerwehren noch innerhalb des Bauwerksbereiches und in seiner unmittelbaren Umgebung beherrscht werden. Gaswolken mit brennbaren und toxischen Gasen erfordern dagegen bereits Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung in der näheren Umgebung des Bauwerkes.

Das Freisetzungsszenario 3 ist bei toxischen und brennbaren Gasen durch die Kräfte einer Feuerwehr nicht mehr zu beherrschen. Die Maßnahmen beschränken sich in diesem Fall auf die

Sicherung der Unfallstelle, die Evakuierung von Personen im wahrscheinlichen Ausbreitungsgebiet und die gezielte Konsequenzminderung außerhalb des Bauwerkes zum Schutz von Personen.

Bei der Freisetzung volatiler Flüssigkeiten ist davon auszugehen, dass im Bauwerk eine Lachenverdampfung stattfindet und gleichzeitig die Flüssigkeit über die Schlitzrinnen in der Fahrbahn zu einem Auffangbecken außerhalb des Bauwerks geleitet wird. Dieses Becken wird außerhalb des Bauwerks zur sekundären Gefahrenstelle und ist ebenso wie die Unfallstelle im Tunnel in die Konsequenzminderungsmaßnahmen einzubeziehen. Es ist an beiden Stellen erforderlich, die Flüssigkeit abzudecken und schließlich in sichere Gefäße zu überführen. Besonders bei toxischen Flüssigkeiten ist das Drainagesystem des Tunnels so zu reinigen, dass die Toxizitätsgrenzwerte unterschritten werden. Für diese Aufgabe sind Spezialisten erforderlich und die Hilfe durch TUIS-Feuerwehren von vornherein einzuplanen.

5.2.3 Brandszenarien

5.2.3.1 Brandszenarien mit normalen Brandstoffen

In diese Gruppe werden alle Brände von Fahrzeugen eingeordnet, die vorzugsweise zum Transport von Personen dienen sowie Brände mit Lkw, die brennbare Feststoffe transportieren, die nicht als Gefahrgüter eingeordnet sind. Zu diesen Feststoffen gehören viele brennbare Baustoffe, einschließlich Holz, Kohle und Kohleerzeugnisse, Papier und Zelluloseprodukte, Naturprodukte einschließlich Nahrungsmittel und Kunststoffe. Fahrzeuge führen grundsätzlich flüssigen oder verflüssigten Treibstoff oder komprimierte Gase als Treibstoff sowie weitere brennbare Flüssigkeiten für unterschiedliche Hilfsfunktionen mit. Dieser Anteil Gefahrgüter ist im Vergleich zu den übrigen Brandstoffen gering und wird hier nicht berücksichtigt. Er muss allerdings im Rahmen der Brandbekämpfung durch die Feuerwehren beachtet werden.

◆ Brandszenario 1

In Folge eines Ereignisses brennen 1 bis 2 Pkw. Eine Rettung von Personen ist nur im Zeitbereich der Brandentwicklung möglich. Dieser Zeitbereich liegt zwischen 4 und maximal 8 Minuten nach der Zündung. Die Brandentwicklung führt innerhalb von 10 Minuten zum Vollbrand der Fahrzeuge. Zu diesem Zeitpunkt sind Personen, die sich in den Fahrzeugen befinden, durch Rauchgase und Flammen bereits verstorben. Die Brandleistung beträgt dann etwa 5 MW pro Pkw. Die Umrechnung auf eine vergleichbare Brandfläche mit Gleichung (7) ergibt für einen Pkw bei einem mittleren Heizwert der brennbaren Stoffe von 20 MJ/kg, einer Abbrandrate von 1kg/m² min bzw. 0,017 kg/m² s und einem Faktor für die vollständige Verbrennung von 0,7 eine Brandfläche für den brennbaren Feststoff von ca. 21 m². Die Brandbekämpfung wird behindert durch nichtbrennbare Flächen (Blech, Glas), die eine gezielte Applikation des Löschmittels verhindern und einen Angriff aus kurzer Distanz erfordern. Es ist die Gefahr des Auslaufens brennbarer Flüssigkeiten mit nachfolgender Zündung und die Möglichkeit der Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge gegeben.

◆ Brandszenario 2

In Folge eines Ereignisses brennen ein großer Pkw (Van) und ein normaler Lkw. Eine Rettung von Personen ist nur im Zeitbereich der Brandentwicklung zwischen 4 und 8 Minuten nach der Zündung möglich. Bei Erreichen des Vollbrandstadiums nach etwa 10 Minuten besitzt der Brand eine HRR von 30 bis 40 MW. Das entspricht einer vergleichbaren Brandfläche von 90 m² bis 120 m², wobei die Randbedingungen entsprechend Brandszenario 1 beibehalten wurden. Die Brandbekämpfung wird behindert durch nichtbrennbare Flächen und auch durch brennbare Abdeckplanen des Lkw. Es besteht die Gefahr des Auslaufens brennbarer Flüssigkeiten mit nachfolgender Zündung. Die Möglichkeit der Brandausbreitung in Strömungsrichtung der Rauchgase ist gegeben.

◆ Brandszenario 3

In Folge eines Ereignisses brennt ein großer Lkw. Eine Rettung von Personen ist nur im Zeitbereich der Brandentwicklung zwischen 4 und 8 Minuten nach Zündung möglich. Bei

Erreichen des Vollbrandstadiums nach etwa 10 Minuten besitzt der Brand eine HRR von 100 bis 200 MW⁶. Das entspricht einer vergleichbaren Brandfläche von 200 m² bis 600 m² und stellt einen Großbrand dar, der auch unter normalen Bedingungen nur mit einem hohen Aufwand an Kräften und Mittel beherrschbar wäre. Der verfügbare Volumenstrom an Löschmittel von 1200 l/min ist unter günstigen Bedingungen für Brandflächen bis 200 m² ausreichend, so dass für derartige Szenarien eine mobile Löschwasserversorgung notwendig wird. Die einseitige Angriffsrichtung von der Luvseite der Strömung erfordert Löschwasser-Wurfweiten bis zu 45 m, wenn man mit einem Abstand von der Flammenfront von 15 m zu Beginn der Brandbekämpfung rechnet. Da allen angegebenen Wurfweiten eine optimale Wurfparabel bei einem Winkel von 32 ° zugrunde liegt, deren Scheitelpunkt in einem Tunnel aufgrund der geringeren Tunnelhöhe nicht zu erreichen ist, wird die maximale Wurfweite etwas geringer ausfallen. Die Aufbauten und äußeren Auskleidungen der Fahrzeuge verhindern die direkte Aufbringung des Löschwassers auf den Brandherden.

5.2.3.2 Brandszenarien mit flüssigen Gefahrgütern

Transporte brennbarer Flüssigkeiten stellen den größten Anteil beim Gefahrguttransport dar. Sie werden aufgrund ihrer Verwendung als Hauptlieferant von Primärenergie für Verbrennungsmaschinen praktisch überall und in großen Mengen genutzt. Dadurch bedingt erfolgt der Transport in großen Tankfahrzeugen, deren Fassungsvermögen bis zu 30 m³ beträgt. Die Tanks dieser Fahrzeuge bestehen aus Aluminiumlegierungen oder Edelstahl. Sie sind einwandig und besitzen zur Minderung der Schwallwirkung der Flüssigkeiten bei Kurvenfahrten und beim Bremsen Schwallbleche, die aber den Tank nicht in Kammern teilen. Der Bedarf an flüssiger Primärenergie ist so hoch, dass die Kapazität der Transportfahrzeuge in hohem Maß ausgelastet ist.

Bei den Brandszenarien wird davon ausgegangen, dass Tankfahrzeuge mit brennbaren Flüssigkeiten in den Unfall verwickelt sind und dass in der Folge Brände unterschiedlicher Größe entstehen können. Den Brandszenarien werden Brandflächen zugeordnet, die von [Persson 2002] in seinen Risikoanalysen angenommen wurden.

◆ Flüssigkeitsbrandszenario 1

In einem Ereignis wird ein Tankfahrzeug mit brennbarer Flüssigkeit beschädigt. Aus einem Leck tritt brennbare Flüssigkeit direkt auf die Fahrbahn aus. Das Leck ist so groß, dass sich eine brennende Lache am Fahrzeug mit einer Fläche von 10 m² bildet. Diese Fläche liefert eine Brandleistung von etwa 17 MW. Das Fahrzeug wird nur teilweise durch die Flammen unterfeuert. Die Gefahr der Vergrößerung der Leckrate besteht aber.

Zielstellung ist das gefahrlose Abdichten der Leckstelle und das Löschen des Brandes der Flüssigkeitslache.

◆ Flüssigkeitsbrandszenario 2

Ein Tankfahrzeug wird bei einem Ereignis so beschädigt, dass ein großes Leck entsteht, welches ein Flüssigkeitslache von 100 m² erzeugt. Die HRR dieser Brandfläche beträgt etwa 170 MW. Es besteht die unmittelbare Gefahr der vollständigen Zerstörung des Tanks und damit der schlagartigen Freisetzung von mindestens 20 m³ brennbarer Flüssigkeit, die sofort zünden würde. Ein größerer Anteil brennbarer Flüssigkeit läuft durch die Schlitzrinnen im Tunnelboden ab. Die ablaufende Flüssigkeit kann nur bis zum nächsten Siphon zur Brandausbreitung beitragen.

Zielstellung ist, das Leck ohne Gefährdung der eingesetzten Kräfte abzudichten, die Flammenwirkung auf den Tank zu minimieren und eine Ausbreitung durch ablaufende Flüssigkeit zu verhindern.

⁶ nach [Ingason und Lönnermark 2004] könnten die HRR bei Ladegutmengen von mehr als 30 t sogar noch wesentlich höher liegen.

◆ Flüssigkeitsbrandszenario 3

Bei einem Ereignis wird der Tank eines Tankfahrzeuges vollständig zerstört und die gesamte brennbare Flüssigkeit schlagartig freigesetzt. Die entstehende Brandfläche wird mit 300 m² angesetzt. [Persson 2002] gibt die HRR mit etwa 300 MW an. Dieser Wert könnte allerdings nach [Ingason und Lönnemark 2004] auch als wesentlich höher angenommen werden. Es dürfte bei diesem Szenario damit zu rechnen sein, dass sich ein pulsierender Brandverlauf einstellt und die Flammenlängen bzw. Durchzündungen größere Entfernungen vom Brandherd erreichen werden. Damit ist mit einer schnellen Brandausbreitung in Strömungsrichtung zu rechnen. Gleichzeitig sind auch die Siphons in den Schlitzrinnen überfordert und die Brandausbreitung wird durch abfließende Flüssigkeit unterstützt.

Der verfügbare Volumenstrom an Löschwasser ist für eine Brandfläche von maximal 150 m² ausreichend. Es muss eine mobile Löschwasserversorgung aufgebaut werden.

Zielstellung ist eine optimale Konsequenzminderung, die Verhinderung der Brandausbreitung im Leebereich und nach Zuführung ausreichender Kräfte und Mittel die direkte Brandbekämpfung.

5.2.3.3 Brandszenarien mit brennbaren Gasen

Ereignisse mit brennbaren Gasen können sich grundsätzlich in zwei unterschiedlichen Richtungen entwickeln. Erfolgt die Zündung der austretenden Gase bzw. der nach dem Austreten verdampfenden Flüssiggase nicht zeitgleich mit dem Ereignis, so werden zunächst abhängig vom Leck, Gasdruck oder Siedepunkt der Flüssiggase unterschiedliche Gasmengen freigesetzt, die sich mit der Luft mischen. Es entstehen explosible Gemische in deren Folgereaktion nach einer Zündung Explosionen unterschiedlicher Stärke auftreten. Erst nach dem das explosive Gemisch reagiert hat, kann das aus einem Leck austretende Gas als Freistrahler oder als Lache brennen. Der Zündzeitpunkt und die Luftbewegung tragen zusätzlich zur Ausbildung der explosiblen Gemische bei.

Erfolgt die Zündung der Gase zeitgleich mit dem Ereignis, entstehen Freistrahlerflammen (bei Leckagen) bzw. Lachenbrände (bei Zerstörung des Transportbehälters) mit hoher Intensität.

Explosionen explosibler Gemische brennbarer Gase entwickeln Detonationsgeschwindigkeiten von 2 bis 4 km/s [Bartknecht 1955]. In diese Reaktionen kann durch mobile Maßnahmen nicht eingegriffen werden. Folgen von Explosionen, insbesondere in verdämmten Bereichen, zu denen auch Tunnel gehören, sind stärkste Zerstörungen und Todesfälle im Bereich des sich ausbreitenden Druckes. Dies führt dazu, keine Szenarien für Explosionen von Gasen für Feuerwehreinsätze aufzustellen.

Brände von Gasen, sowohl Freistrahlerbrände als auch Lachenbrände, können mobil bekämpft werden, wobei allerdings das Hauptziel der Brandbekämpfung nicht das Löschen der Flammen sondern das Abdichten der Lecks an den Transportbehältern ist. Während Freistrahlerflammen mit dem Abdichten des Lecks von selbst verlöschen, werden Flüssiggaslachen weiter brennen. Solange es nicht möglich ist, die Flüssigkeitslache in ein geschlossenes Behältnis zu überführen, darf der Abbrand des Flüssiggases nicht unterbrochen werden, da sich neuerlich explosive Gemische bilden können. Dies gilt auch für Teilflächen und Hohlräume.

◆ Freistrahlerbrandszenario 1

Durch ein Ereignis wird ein Fahrzeug mit Druck- oder Flüssiggasbehältern beschädigt. Es kommt zur Zündung des austretenden Gases. In der Folge des Ereignisses bildet sich ein Freistrahlerbrand am Behälter aus. Die Größe des Lecks gibt ein Gasvolumen von 40 l/s frei. Der Freistrahlerbrand hat eine direkte Wirkung auf den Behälter und heizt diesen auf.

Zielstellung ist, das Leck bei möglichst geringer Gefährdung abzudichten. Im Zeitraum des Abdichtens ist der Freistrahler zu kühlen, jedoch nicht zu löschen.

◆ **Freistrahlsbrandscenario 2**

Durch ein Ereignis wird der Tank eines Flüssiggastransporters beschädigt. Die Leckstelle gibt Flüssiggas in einer Größenordnung von 1 kg/s frei, die als Freistrahls sowie als Flüssiggaslacke verbrennen. Der Tank des Fahrzeuges wird thermisch stark belastet und die Möglichkeit der Ausbildung eines BLEVE besteht. Die vorhandene Gesamtmasse an Flüssiggas beträgt mindestens 10 t.

Zielstellung ist, die Ausbildung eines BLEVE zu verhindern

◆ **Flüssiggaslackenbrand 3**

Durch ein Ereignis wird ein Flüssiggastankfahrzeug so beschädigt, dass der Tank aufreißt und das gesamte Flüssiggas mit einer Masse von mindestens 10 t freigesetzt wird. Die sofortige Zündung führt in der ersten Phase zu einer Stichflammenbildung, bei der bis zu einem Drittel der verfügbaren Masse verbrennt. Die Stichflamme wird sich kurzzeitig in Strömungsrichtung durch den gesamten Tunnel ausbreiten. Zündungen von Fahrzeugen und Ladungen sind möglich. Für ungeschützte Personen besteht die Gefahr von Verbrennungen auf der Haut und ein Inhalationsschock. Nach Abklingen der Flashverdampfung stellt sich eine intensive Lackenverbrennung ein, weil die Siedetemperatur des Flüssiggases unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

Zielstellung kann hier nur sein, Konsequenzminderungsmaßnahmen für die Umgebung durchzuführen und die Wirkung auf Personen durch weiträumige Absperrungen zu minimieren.

Bei Ereignissen mit komprimierten und verflüssigten Gasen ist die Gefahr einer Explosion generell nicht auszuschließen. Explosionen rufen bereits bei mittleren Leckraten im Tunnel ernste Gefahren für die Tunnelnutzer hervor, so dass mit einer hohen Anzahl an Verletzten zu rechnen ist. Konsequenzminderungsmaßnahmen in Tunneln sind durch die Feuerwehren weder stationär möglich noch mobil zu erreichen.

Die dargestellten Einsatzszenarien für die Feuerwehr lassen erkennen, dass der Schwerpunkt der Maßnahmen nicht in der Bekämpfung des Ereignisses liegt, sondern in der Beseitigung der entstandenen Leckagen. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass bereits mittlere Szenarien die Leistungsfähigkeit einer Feuerwehr übersteigen. Es ist infolge der einseitig begrenzten Angriffsrichtung und dem Erfordernis, die Wirkung der Freistrahlsflammen auf den Tank bzw. Container zu mindern, nur unter günstigsten Bedingungen möglich, Erfolge zu erzielen. Das Risiko für die Einsatzkräfte, die vor Ort das Abdichten des Tanks vornehmen müssen, bleibt so hoch, dass Gefahr für Leben und Gesundheit besteht.

5.2.3.4 Brände mit toxischen brennbaren Stoffen

Toxische brennbare Stoffe können in jedem Aggregatzustand auftreten. Im Gegensatz zu den normalen Brandszenarien ist bei diesen davon auszugehen, dass durch die Verbrennung das toxische Transportgut im Wesentlichen beseitigt wird. Solange die Verbrennung anhält kann somit angenommen werden, dass dessen Ausbreitung nicht stattfindet. Dann ist nur noch die Toxizität der Verbrennungsprodukte zu berücksichtigen. Erst mit erfolgtem Löschen kann sich das toxische Gefahrgut ungehindert ausbreiten. Es ist deshalb bei derartigen Gefahrenlagen erforderlich, entweder während des Brandes oder unmittelbar danach unter bezüglich des Stoffes angepassten Schutzmaßnahmen dessen Freisetzung durch sicheres Abdichten des Lecks zu stoppen. In derartigen Szenarien bestehen sowohl das Freisetzungsszenario als auch das Brandszenario nebeneinander und die Maßnahmen zu einem der beiden Szenarien können sowohl negative als auch positive Wirkungen auf das andere Szenario haben.

5.3 Bewertung der Einsatzszenarien

Eine Bewertung der Einsatzszenarien muss zwei wesentliche Gesichtspunkte beachten:

- ◆ Gefährdung des Lebens und der Sicherheit von Tunnelnutzern
- ◆ Möglichkeiten und Risiko der Einsatzkräfte bei der Bekämpfung der Ereignisse.

Die Gefährdung der Tunnelnutzer und des Bauwerks durch die drei Hauptgefahren

- ◆ Explosion,
- ◆ Freiwerden giftiger Gase oder flüchtiger giftiger flüssiger Stoffe und
- ◆ Brände

wird im Wesentlichen durch die nach ADR zu treffende Tunnelkategorisierung abgebildet. In Übereinstimmung mit Tabelle 6 wurden die Tunnelkategorien der ADR durch Zuordnung der verschiedenen Einsatzszenarien konkretisiert. Diese Tunnelkategorien werden der besseren Übersicht wegen an dieser Stelle als Tabelle 6a nochmals aufgeführt. Die Spalte 3 enthält die für die Feuerwehr abgeleiteten Einsatzszenarien.

Tabelle 6a: Tunnelkategorien nach [ADR 2007]

| Kategorie | Beschränkung | Einsatzszenarien |
|-----------|---|---|
| A | keine Beschränkungen für gefährliche Stoffe (UN 2919 und 3331, siehe 8.6.3.1 ADR 2007) | Alle Szenarien |
| B | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer <ul style="list-style-type: none"> ◆ sehr großen Explosion führen können | Alle Unfallszenarien Alle Freisetzungsszenarien Alle Brandszenarien Alle Flüssigkeitsbrandszenarien Freistrahlblandszenario 1 und 2 |
| C | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> ◆ sehr großen Explosion ("B"-Güter) ◆ großen Explosion ◆ umfangreiches Freiwerden giftiger Stoffe führen können | Alle Unfallszenarien Alle Brandszenarien Alle Flüssigkeitsbrandszenarien Freistrahlblandszenario 1 |
| D | Beschränkungen für gefährliche Güter, die zu einer/einem <ul style="list-style-type: none"> ◆ sehr großen Explosion ("B"-Güter) ◆ großen Explosion ◆ umfangreiches Freiwerden giftiger Stoffe ◆ großen Brand führen können. | Alle Unfallszenarien Brandszenarien 1 und 2 Brandszenario 3 als HGV Flüssigkeitsbrandszenarien 1 und 2 Freistrahlblandszenario 1 |
| E | Beschränkungen für alle gefährlichen Güter außer UN-Nummern 2919, 3291, 3331, 3359 und 3373 | Alle Unfallszenarien Brandszenarien 1 und 2 (ohne Gefahrgut) Brandszenario 3 als HGV |

Für diese Tunnelkategorien wurden schließlich Tunnelbeschränkungscode entwickelt, welche die Beschränkung der Gefahrguttransporte bezogen auf die Tunnelkategorien beinhalten. In Tabelle 34 soll der Entwurf der Tunnelbeschränkungscode gemäß ADR 2009 dargestellt werden, der dem Ausarbeitungsstand der Codes von 2007 noch einige Veränderungen in den Mengenbeschränkungen hinzufügt.

Die Umsetzung dieser Codes ist nach ADR 2007 zu realisieren. In einer Tabelle werden alle Gefahrgüter nach UN-Nummern geordnet aufgeführt und der zugehörige Tunnelbeschränkungscode ausgewiesen. Schwerlasttransporte mit energiereichem Transportgut (Kunststoffe, Fette, Öle usw.) unterliegen nicht dem ADR und damit auch dieser Kategorisierung nicht. Deshalb ist auch in der Tunnelkategorie E ein sehr großer Brand (Brandszenario 3) möglich. Insgesamt stellt sich die Situation so dar, dass die Tunnelkategorien die globalen Beschränkungen wiedergeben, die in ihrer Größe durch den Tunnelbeschränkungscode bestimmt werden. Sehr große Explosionen werden demnach durch mindestens 5 t (C5000D) und große Explosionen durch 1 t Nettoexplosivstoffmasse (B1000C) verursacht.

Wie bereits ausgeführt wurde, sind entscheidende Konsequenzminderungen für Explosionen in Tunneln weder durch stationäre noch durch mobile Maßnahmen erreichbar. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung des Ablaufs aller Explosionen können die Einsatzkräfte ausschließlich bei den Folgereaktionen eingreifen und diese Gefahren beseitigen. Zusätzlich sind Hilfeinsätze zur Bergung von Verletzten und Toten zu erwarten.

Tabelle 34: Tunnelbeschränkungscode gemäß Entwurf ADR 2009 [BAM 2008]

| Tunnelbeschränkungscode der gesamten Ladung | Beschränkung |
|---|--|
| - | Durchfahrt durch alle Tunnel erlaubt ("A"-Tunnel) (UN 2919 und 3331, siehe 8.6.3.1) |
| B | Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie B, C, D und E |
| B1000C | Wenn die gesamte Nettoexplosivstoffmasse je Beförderungseinheit größer als 1000 kg ist: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie B, C, D und E , kleiner als 1000 kg ist: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E |
| B/D | Beförderung in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E anderer Transport: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E |
| B/E | Beförderung in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien B, C, D und E anderer Transport: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien E |
| C | Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E |
| C5000D | Wenn die gesamte Nettoexplosivstoffmasse je Beförderungseinheit größer als 5000 kg ist: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie C, D und E , kleiner als 5000 kg ist: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E |
| C/D | Beförderung in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E anderer Transport: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E |
| C/E | Beförderung in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien C, D und E anderer Transport: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien E |
| D | Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie D und E |
| D/E | Beförderung in loser Schüttung oder in Tanks: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien D und E anderer Transport: Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorien E |
| E | Durchfahrt verboten durch Tunnel der Kategorie E |

Für Brandszenarien ist zu konstatieren, dass große Brände sowohl bei Gefahrguttransporten als auch bei normalen Transporten (HGV) auftreten können. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Gefahrgüter auch flüssige und toxische Stoffe umfassen und damit die Brandbekämpfung von Flüssigkeitsbränden notwendig wird.

Freisetzungsszenarien sind als typische Szenarien für Gefahrgüter anzusehen. Im Gegensatz zu den Brandszenarien sind für diese Szenarien wenige Maßnahmen zur Konsequenzminderung bekannt, die in der Regel auch noch stoffspezifisch variiert werden müssen. Die allgemein einsetzbare Variante des Verdünnens mit Luft ist aufgrund der außerordentlich geringen Grenzwerte toxischer Stoffe nur wenig effizient und erfordert Belüftungsgeräte mit sehr hoher Leistung. Die zusätzliche Variante des Niederschlagens einer freigesetzten toxischen Wolke mit Wasser ist von der Löslichkeit des toxischen Stoffes abhängig. Sie ist im offenen System deutlich unwirksamer und erreicht meist weniger als 0,1% der maximal möglichen Lösungskonzentration in Wasser, da die Kontaktzeiten mit den Wassertropfen sehr kurz sind [Pleiß und Wienecke 1998]. Zusätze zum Löschwasser, z.B. Neutralisationsmittel, chemisch reagierende Stoffe sind praktisch nicht vorzuhalten und würden ebenfalls nur dann effizient wirken, wenn eine intensive Behandlung der Schadgaswolke möglich wäre. Außerdem steht die Wärmetönung der Neutralisationsreaktion dem Absorptionsprozess entgegen [Pleiß und Seliger 1993].

Die Feuerwehren besitzen meist als Sonderausrüstung so genannte Be- und Entlüftungsgeräte, deren Leistung mit maximal 30.000 m³/h (8 m³/s) begrenzt ist. Hier wird deutlich, dass diese Geräte für große Freisetzungen wenig effizient eingesetzt werden können. Es gibt allerdings auch so genannte Tunnellüfter, die Leistungen bis zu 1.000 000 m³/h (3000 m³/s) erreichen. Für Gefahrgutfreisetzungen sind derartige mobile Tunnellüfter eine wichtige Sonderausrüstung, weil die im Tunnel vorhandenen Lüfter in der Regel keinen Explosionsschutz besitzen und damit bei Freisetzungen toxischer und brennbarer Stoffe nicht genutzt werden können.

Für Tunnel der Kategorien A bis C bedarf es somit der Ausnutzung jeglicher Möglichkeiten der betrieblichen Konsequenzminderung und der speziellen Ausrüstung der Feuerwehren, um Gefahren bei Ereignissen mit schwerwiegenden Auswirkungen auf Tunnelbenutzer, den Tunnel als Bauwerk, die unmittelbare Umgebung und die eingesetzten Kräfte optimal begegnen zu können.

In Tunneln der Kategorie D sind große Brände mit Gefahrgütern ausgeschlossen. Es besteht allerdings die Möglichkeit des Eintritts von Ereignissen mit mittleren und kleinen Bränden mit Gefahrgütern sowie kleinen Explosionen. Mit anderen Stoffen (HGV) sind jedoch auch große Brände möglich.

In Tunneln der Kategorie E sind Gefahrguttransporte verboten, dennoch sind auch hier alle Brandszenarien möglich.

5.4 Schaffung optimaler Einsatzbedingungen

5.4.1 Große und sehr große Explosionen

Gefahrguttransporte, bei denen große bis sehr große Explosionen als mögliches Ereignisszenario angesehen werden, sind in Tunneln der Kategorie A und B gestattet. Für Explosionen gibt es keine Gegenmaßnahmen. Es entstehen schwerste Schäden und eine hohe Zahl an Schwerverletzten und Toten.

- ◆ Maßnahmen aus der Sicht der Tunnelbetreiber
 - Vorbereitung von Räumlichkeiten für den Fall einer notwendigen Erstversorgung Verletzter
- ◆ Maßnahmen aus der Sicht der Feuerwehr
 - Aufbau einer Rettungsgruppe
 - Ausrüstung der Rettungsgruppe mit modernen Geräten und Mitteln für die Erstversorgung

5.4.2 Freisetzungen toxischer und brennbarer Gase und Dämpfe

Gefahrguttransporte toxischer und brennbarer Gase sind ausschließlich in den Tunnelkategorien A und B möglich. Für die Konsequenzminderung bei Ereignissen mit diesen Gefahrgütern könnten folgende Maßnahmen realisiert werden, wobei nicht von der Zündung der brennbaren Gase durch das Ereignis ausgegangen wird:

- ◆ Maßnahmen aus der Sicht der Tunnelbetreiber
 - Gaswarnanlagen sollten um PID-Messgeräte (brennbare Stoffe) und selektive Gasmessgeräte ergänzt werden.
 - In Tunneln der Kategorien A, B und C sollten Lüftungsanlagen und die technische Tunnelausrüstung explosionsgeschützt ausgerüstet werden, um die Schadgase (toxisch und brennbar) sofort und mit hoher Effizienz verdünnen zu können.
 - Möglichkeiten zur Ansammlung von Schwergaswolken im Tunnel, an den Portalen oder in Nebengelassen, Versorgungseinrichtung u.a. sind zu eruieren und Maßnahmen zur Verhinderung einzuleiten.
 - Ungünstige Abströmverhältnisse an den Portalen sollten so verändert werden, dass sich der austretende Luftstrom in der Luft weiter verdünnen kann.
 - Errichten einer stationären Brandbekämpfungsanlage, die im Fall der Gas-Freisetzung zur Niederschlagung der löslichen Gase genutzt wird und gleichzeitig für ein optimales Durchmischen (Verdünnen) der Gaswolke sorgt.

- ◆ Maßnahmen für die Feuerwehren
 - Einrichten einer Rettungsgruppe mit Möglichkeiten der multiplen Erstversorgung von Schwerverletzten
 - Beschaffung großer mobiler explosionsgeschützter Belüftungsgeräte
 - Beschaffung ausreichender Chemikalienschutzanzüge sowie Gaswarngeräte (Ex/Tox)

5.4.3 Große Brände brennbarer Flüssigkeiten

Gefahrguttransporte mit brennbaren Flüssigkeiten sind durch Tunnel der Kategorie A bis D möglich. Grundsätzlich ist bei Bränden brennbarer Flüssigkeiten ein Lachenbrand auf der Fahrbahn des Tunnels und möglicherweise auch unter dem Tankbehälter sowie ein Kaskadenbrand am jeweiligen Leck des Tankbehälters zu erwarten. Ein Teil der brennbaren Flüssigkeit wird über Hohlborddrinnen (Schlitzrinnen) abgeführt und nach jeweils 50 m in einen Schmutzwasserkanal abgeleitet. Die Ableitung verläuft über einen Siphon, so dass Flammen nicht eindringen können. Im gesamten Bereich der Hohlborddrinnen sind allerdings Flammen möglich. Die Höhe dieser Flammen liegt bei 1 bis 1,5 m. Diese Flammen sind in der Lage, eine Brandübertragung auf andere Bereiche zu erleichtern bzw. nach einem teilweisen Löscherfolg als Zündquelle für Rückzündungen zu sorgen (siehe Kapitel 4.2).

Die Größe des Lachenbrandes wird bestimmt durch die aus dem Leck des Tankwagens auslaufende Masse brennbarer Flüssigkeit, der Neigung der Fahrbahn und der Aufnahmefähigkeit der Hohlborddrinnen. Für große Brände auf einer Fläche von mehr als 100 m² (Flüssigkeitsbrandszenario 3) und auch mittlere Brände von etwa 100 m² (Flüssigkeitsbrandszenario 2) werden HRR's von 150 MW bis 300 MW erwartet. Entsprechend der Hydrocarbon-Kurve, die gültig für Brände brennbarer Flüssigkeiten im Freien ist, und im Maximalbereich der RWS-Kurve für Tunnel werden bei diesen Bränden Temperaturanstiege bis 1000 °C in einer Zeitspanne von maximal 10 Minuten ab Brandbeginn und bis ca. 1300°C nach etwa 20 Minuten erreicht. Die Flammen breiten sich über den Bereich der Flüssigkeitslache, der Leckstelle und der abfließenden Flüssigkeit schlagartig aus. Das heiße Rauchgas wird als großvolumiger, heißer Gasstrom in der vorherrschenden Strömungsrichtung abgehen.

- ◆ Maßnahmen im Verantwortungsbereich der Tunnelbetreiber
 - Ausrüstung des Tunnels mit einer stationären Brandbekämpfungsanlage, die in der Lage ist, die Lachen der brennbaren Flüssigkeiten mit Schaum abzudecken und dadurch Rückzündungen zu vermeiden
 - Die Brandbekämpfungsanlage sollte als Sprühschaum- oder Schaumlöschanlage ausgelegt sein und es sollte AFFF-Schaummittel als Zusatz verwendet werden.
 - Die Anlage sollte automatisch oder manuelle durch das Personal der Tunnelleitstelle unmittelbar nach Entstehen des Brandes in Betrieb gehen, weil damit die Phase der Brandentwicklung deutlich hinausgezögert werden kann.
- ◆ Maßnahmen für die Feuerwehren
 - Die Einsatzzeit der Feuerwehren an jedem Punkt eines möglichen Ereignisses im Tunnel sollte unter 8 Minuten betragen. Gerechnet wird bei dieser Einsatzzeit vom Zeitpunkt der Alarmierung bis zur Abgabe des ersten Löschmittels in ausreichender Menge vor Ort.
 - Die Feuerwehren sollten grundsätzlich mit AFFF-Schaummittel ausgerüstet sein. Schaummittel sollten dem Löschwasser bei jedem Einsatz zugemischt werden.
 - Die Feuerwehr muss vor Ort in der Lage sein, den gesamten verfügbaren Volumenstrom an Löschwasser einzusetzen. Dies ist im ersten Abmarsch nur mit einem Gruppenlöschfahrzeug realisierbar.

5.4.4 Brände von Stoffen, die nicht dem ADR unterliegen (Heavy Goods)

Transporte von normalen festen und flüssigen Stoffen, die brennbar sind, aber nicht in die Gruppe der brennbaren Gefahrgüter fallen, können durch alle Tunnel der Kategorien A bis E erfolgen. Zu dieser Gruppe von Stoffen gehören Holz und Holzwerkstoffe, Zelluloseprodukte, Fette und Öle, auch schwere mineralische Öle, Thermoplaste und vernetzte, nicht schmelzende Polymere. Diese Produkte stellen einen hohen Anteil des gesamten Transportvolumens dar.

Die Ursachen für Brände mit diesen an sich nur schwer zu zündenden Stoffen können vielfältig sein. Sie umfassen Selbstentzündung, Zündung infolge anderer Stoffe, Zündung durch mechanische oder thermische Beanspruchung bis hin zu bewusster Brandstiftung.

Brände dieser Stoffe haben häufig eine längere Entwicklungszeit, ehe sie als Brand erkannt werden. Grundsätzlich gilt aber, wenn diese Stoffe mit offenen Flammen brennen, dann ist die Zeit bis zu einem vollentwickelten Brand nicht wesentlich länger als bei brennbaren Gefahrgütern. Auch bei diesen Bränden muss davon ausgegangen werden, dass in den ersten 10 min Gastemperaturen von 1000 °C erreicht werden können. Da bei großen Bränden und Brandstoffen mit hohem Heizwert, wie Kunststoffe, Fette und Öle, ebenfalls HRR's mit bis zu 200 MW erreicht werden können, stellen auch diese Brände hohe Anforderungen an die mit ihrer Bekämpfung beauftragten Einsatzkräfte.

- ◆ Maßnahmen im Verantwortungsbereich der Tunnelbetreiber
 - Überwachen des Fahrzeugstroms mit Wärmebildgeräten vor dem Tunnel und Stoppen von Fahrzeugen mit heißer oder erwärmter Ladung vor dem Tunnel.
 - Installation von Brandbekämpfungsanlagen im Tunnel in Abhängigkeit von der Länge des Tunnels, der Einsatzzeit und der Größe der Feuerwehr.
- ◆ Maßnahmen aus der Sicht der Feuerwehr
 - Einsatz leistungsfähiger Löschgruppenfahrzeuge für den Erstangriff
 - Verringerung der Einsatzzeit bis zur ersten Abgabe an Löschmittel auf weniger als 8 Minuten
 - Erarbeiten einer effektiven Taktik für den Einsatz bei großen Bränden

5.4.5 Kleine Brände von Gefahrgütern

In diesem Kapitel sollen vor allem Brände beim Transport von Gefahrgütern berücksichtigt werden, die nicht ohne weiteres mit der Technik der Feuerwehr zu beherrschen sind. Dazu gehören vor allem Kaskadenbrände brennbarer Flüssigkeiten und Freistrahlsbrände von Gasen. Beide Brandarten stehen immer im Zusammenhang mit einem Leck an einem Behälter. Es ist schwierig, die Brände sicher zu löschen, weil meist Rückzündungen mit schwereren Folgereaktionen, wie Explosionen oder schnelle Brandausbreitungen, zu erwarten sind. Diese in ihrer Größe begrenzten Brände erfordern fast immer technische Maßnahmen, wie Abschiebern einer Leitung, Abdichten eines Behälters oder Beseitigen des brennbaren Stoffes, ehe man das Ereignis beherrschen kann. Die Brandbekämpfung erfordert meist spezielle Löschtechniken, wie das Abheben einer Flamme vom Austrittsbereich bis zum Verlöschen oder die Bekämpfung brennender Flüssigkeitstropfen mit Löschpulver oder Wasserdampfnebel.

- ◆ Maßnahmen aus der Sicht der Feuerwehr
 - Ausrüstung der Feuerwehr mit Equipment zum Abdichten von Leckagen und Schließen von Rohrleitungen an Tankfahrzeugen, Gasflaschen u.a. Behältern
 - Spezielle Löschtechnik für diese Brände
 - Übungen zum Beherrschen der technischen Abdichtung von Leckagen
 - Übungen im Zusammenwirken technischer Maßnahmen und Löschtechnik

6 Grenzen der Feuerwehren bei Einsätzen

6.1 Hilfeleistungseinsatz

Der Hilfeleistungseinsatz bei Unfällen in Tunneln wird aufgrund der engen Umgrenzungen durch das Bauwerk erheblich erschwert. Insbesondere kann die Bergung eingeklemmter Personen durch fehlende Aktionsräume, Bewegungsfreiheit behindert werden. Die einzusetzende Technik muss diesen Randbedingungen angepasst sein, wenn Rettungseinsätze in Tunneln effektiv ablaufen sollen. Ein Satz effizienter Geräte sollte zur unmittelbaren Verfügung stehen. Auch für schwere Unfälle geeignete Geräte müssten schnell eingesetzt werden können. Die hierfür zu erarbeitende Einsatzplanung wird dann optimal sein, wenn für Unfälle leichte, kräfteschonende und dem Stand der Technik entsprechende Geräte zur Verfügung stehen und für schwere Unfälle die in der Feuerwehr nicht verfügbare Technik schnell und sicher zu allen Tages- und Nachtzeiten herangeführt werden kann. Die geborgenen Personen müssen unmittelbar vor Ort versorgt werden.

Gleichzeitig muss die entsprechende Technik für Maßnahmen der Konsequenzminderung im Unfallbereich verfügbar sein. Dies betrifft bei auslaufenden Flüssigkeiten die Bereitstellung von Schaum mit hoher Effizienz (AFFF-Schaummittel), bei austretenden Flüssiggasen Löschpulver oder Wasserdampf und ein Belüftungsgerät mit explosionsgeschütztem Antrieb.

Grenzen sind in der Ausrüstung zu sehen, die nur teilweise verfügbar ist. Auch die im ersten Abmarsch verfügbaren Kräfte reichen für alle angesprochenen Arbeiten nicht aus.

6.2 Einsatz bei Freisetzung

Werden bei einem Ereignis toxische Schadstoffe freigesetzt, ist es unabdingbar, dass alle Einsatzkräfte, die sich dem Unfallort nähern, einschließlich des Einsatzleiters und des Maschinisten, umluftunabhängigen Atemschutz tragen. Erfordern die toxischen Stoffe zusätzlichen Körperschutz, müssen Schutzanzüge für die Einsatzkräfte vor Ort verfügbar sein. Falls erforderlich, ist die Dekontamination der Einsatzkräfte zu gewährleisten. Eine Dekontaminationsmöglichkeit muss deshalb bei Einsatzbeginn angefordert und gegebenenfalls nachgeführt werden.

Die wesentlichen Maßnahmen der Konsequenzminderung sind das Verdünnen des Stoffes in der Luft und die Absorption des toxischen Stoffes durch Wasser. Die Belüftungsgeräte müssen eine hohe Leistung besitzen und explosionsgeschützt sein. Beide Maßnahmen haben aber aufgrund der niedrigen Grenzwerte toxischer Stoffe keine hohe Effizienz. Dies bedeutet, dass diese Maßnahmen über längere Zeiträume aufrechterhalten werden müssen. Der Atemschutz ist für den gesamten Zeitraum zu gewährleisten.

Freisetzungseinsätze erfordern sowohl für den Lüftereinsatz als auch für den Einsatz von Sprühwasser die entsprechenden Kräfte. Zusätzliche Kräfte (Messtrupps) sind zur Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen einzusetzen.

Die Grenzen dieser Einsätze werden durch die Kräfteanzahl zu Beginn des Einsatzes, die Verfügbarkeit der Schutzausrüstung und der Spezialtechnik (Hochleistungslüfter) bestimmt.

6.3 Löscheinsatz

Jeder Arbeitsprozess wird hinsichtlich der Optimierung von Arbeitsabläufen untersucht. So gilt es auch im Bereich der Gefahrenabwehr, mit einem möglichst geringen Aufwand ein Optimum an Leistung zu erbringen. Im Gegensatz zu normalen Arbeitsabläufen, bei denen die erforderlichen Mittel vorgegeben und die Arbeitsschritte ausgefeilt und wiederholbar sind, ist die Gefahrenabwehr darauf angewiesen, dass ihren Maßnahmen bestimmte Einsatzszenarien zugrunde liegen, welche die Ereignisart und seine wahrscheinliche Größe beschreiben. Die Einsatzszenarien sind im wesentlichen auf bestimmte Objekte bezogen. Dennoch leitet aus diesen Einsatzszenarien schließlich die Feuerwehr, vorzugsweise auch aus der Sicht ihres in

Einsätzen angesammelten Erfahrungsschatzes, die notwendigen Methoden und Verfahren für die Einsätze ab. Zu beachten ist, dass diese in fast allen Fällen zusätzlich von den vorhandenen Umgebungsbedingungen abhängig sind. Das betrifft beispielsweise die verfügbaren Löschmittelmengen, die in Wohngebieten durch die DVGW-Vorschriften, in Industriegebieten durch die Industriebaurichtlinien oder in Tunneln durch Tunnelrichtlinien wie die RABT limitiert sind.

Für Einsatzszenarien in Tunneln gilt nach [RABT 2006] eine verfügbare Wassermenge von 1200 l/min. Dies ergibt von vornherein eine Begrenzung der löschraren Brandflächen, wenn man der Berechnung aus internationalen Erfahrungen resultierende Anwendungsraten zugrunde legt, wie die Tabelle 35 zeigt. Als Randbedingung wurde bei dieser Berechnung berücksichtigt, dass 1/3 des verfügbaren Löschwassers für den Einsatz von Schutzrohren vorzusehen ist. Dieser Wert ist bei Bränden in großen Räumen mit hohen Raumtemperaturen als minimaler Wert anzusehen.

Tabelle 35: Grenzen der Löschrbarkeit von Tunnelbränden bei Löschwasserströmen von 800 l/min

| Ereignisszenario | Löschmittel | Löschverfahren | Anwendungsrate l/min*m ² | Löschrbare Fläche (Maximum) m ² |
|---|-------------|----------------------------|--|---|
| HGV (schmelzende und nichtschrmelzende Feststoffe) | Wasser | Vollstrahl | 8 - 10 | 80 - 100 |
| | | Sprühstrahl | 6 - 8 | 100 - 135 |
| | | Sprühstrahl/ Netzwasser | 4 - 6 | 135 - 200 |
| Brennbare Flüssigkeit | Schaum | Schwertschaum | | |
| | AFFF | | 4 - 6 | 135 - 200 (150) |
| | MBS | | 8 | 100 (75) |

Die ausgeführte Abschätzung geht im Fall der brennbaren Flüssigkeiten von einem Flüssigkeitspool aus, auf dem der Schaum ungehindert fließen kann. Bei einem Tunnelbrand muss man ebenso wie bei einem Flugzeugbrand damit rechnen, dass das Tankfahrzeug in einer Lache steht und damit nicht nur die Ausbreitung des Schaums behindert sondern außerdem das Schließen der Schaumdecke. Somit sind maximal 75 % der für Freibrände berechneten Fläche mit Schaum löschrbar. Zusätzlich muss beachtet werden, dass der Schaum normalerweise auf der Oberfläche brennbarer Flüssigkeiten fließt. Bei Flüssigkeitslachen mit geringen Schichtdicken bis zu 2 mm wird die Ausbreitung des Schaums gehemmt, so dass die Taktik geändert und eine gezielt Beaufschlagung der Lachenfläche notwendig wird.

Im Fall der festen Brandstoffe kann die Umrechnung auf eine ebene Brandfläche allenfalls eine Hilfe für die Einsatzkräfte sein, das dreidimensionale Brandobjekt, dem eine definierte HRR zugeordnet ist, hinsichtlich des Löschmittelbedarfs einzuschätzen. Die Abbildung 37 zeigt den Zusammenhang zwischen einer ebenen Brandfläche mit definierter Abbrandrate und der HRR. Auf diesen Zusammenhang wird im Kapitel 6.4 noch näher eingegangen. Aus der Abbildung 37 wird deutlich, dass eine ebene Holz-Brandfläche von 100 m² mit einer HRR von 33 MW zu bewerten ist. Diese HRR entspricht einem mittleren Brandszenario.

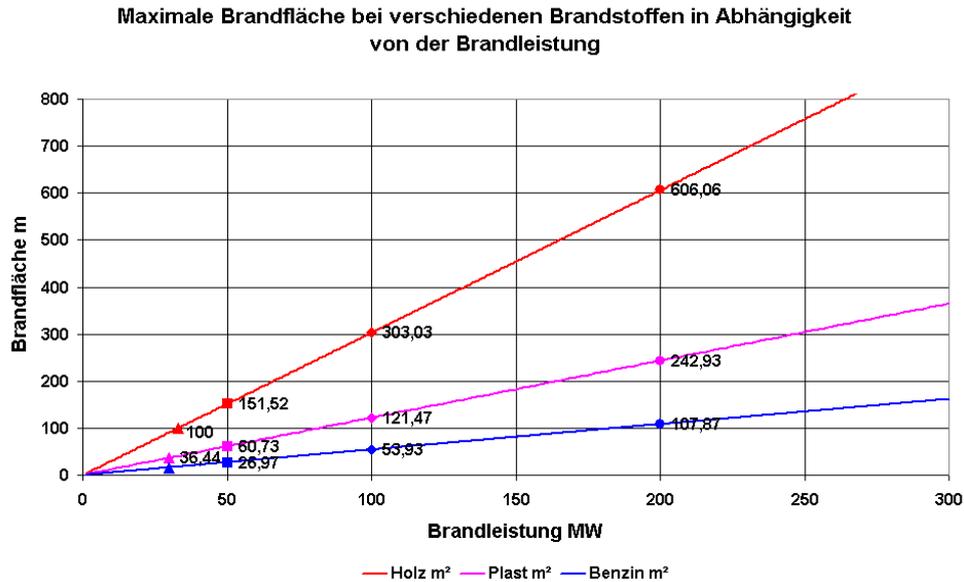


Abbildung 37: Abschätzung nach Projektion der HRR dreidimensionaler Brandobjekte auf ebene Flächen

Von den gewählten Löschverfahren hat natürlich der Vollstrahl bzw. der Schwerschaum die größte Wurfweite, während mit Sprühstrahlen aufgrund ihrer geringeren Wurfweiten bei HGV mit Längen bis 28 m keine Chancen bestehen, die gesamte brennende Fläche mit Löschwasser zu beaufschlagen. Diese Leistung kann nur dann erbracht werden, wenn die gesamte verfügbare Löschwassermenge eingesetzt werden kann. Wird die Löschwassermenge gesplittet in 1/3 (Kühlung) und 2/3 (Löschen), müssen mindestens zwei Trupps den Einsatz vortragen. Das ist allerdings nur möglich, wenn ein voll ausgerüsteter Trupp in Reserve steht, um die Einsatzkräfte bei nicht vorhersehbaren Veränderungen der Ereignisentwicklung aus der Gefahrenzone zu bringen. Somit kann ein Staffelfahrzeug den Löscheinsatz im Tunnel grundsätzlich nicht bewältigen. Es sei denn, dass zuerst das Schutzrohr durch einen Trupp stationär in Stellung gebracht wird und fest eingerichtet die Kühl- und Sicherungsfunktion realisiert werden kann, ohne Kräfte am Strahlrohr zu binden. Danach könnte der Löschrupp im Schutz des „stationären Strahlrohrs“ den Angriff allein vortragen. Bei einem Durchsatz von 800 l/min müsste der Löschrupp allerdings aus 3 Kräften bestehen, so dass noch ein Rettungstrupp verfügbar wäre.

Zusätzlich muss davon ausgegangen werden, dass alle Einsatzkräfte, einschließlich Maschinist, mit umluftunabhängigen Atemschutz ausgerüstet sein sollten. Ausnahmen sind nur bei Tunneln mit zwei Röhren oder im luvseitigen Tunnelbereich von Einröhrentunneln möglich, wenn eine Überwachung der strömenden Luft möglich ist und ein Ausfall der Lüfter ausgeschlossen werden kann. Der Atemschutz gehört zu den grundsätzlichen Schutzmaßnahmen bei der Tunnelbrandbekämpfung und muss für alle Einsatzkräfte verfügbar sein.

6.4 Ableitungen aus der HRR bei Löscheinsätzen

Die Wärmefreisetzungsrate (HRR) wird bei Brandversuchen und bei allen daraus abgeleiteten Brandszenarien als wesentliche Kenngröße des Brandes dargestellt. Sie gibt an, wie viel Energie in Joule von der gesamten Brandfläche pro Sekunde freigesetzt wird ($1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$). Diese Betrachtungsweise ermöglicht es, die thermischen Belastungen auf das Bauwerk und die eingesetzten Werkstoffe zu berechnen.

Im Feuerwehrwesen ist der Begriff der HRR nicht unmittelbar anwendbar. Zwar wurden ähnliche Ansätze für die Abschätzung der erforderlichen Anwendungsraten für das Löschmittel Wasser entwickelt, bei denen eine Gesamtenergiebilanz der Verbrennungsreaktion zugrunde liegt. Jedoch musste aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweisen des Löschwassers die Gesamtbilanz korrigiert werden. Beim Löschen unmittelbar an den Oberflächen der kondensierten Phase wurde nur noch die abgeschätzte Energie berücksichtigt, die durch

verschiedene Transportprozesse von der Flamme in die kondensierte Phase des brennbaren Stoffes gelangt. Gleichzeitig musste auch ein Wirkungsgrad des Löschwassers als energieaufnehmende Komponente des Löschvorganges berücksichtigt werden. Bei Betrachtung des Löschprozesses im gesamten Raumvolumen eines Brandes musste schließlich die Inertisierung der Raumatmosphäre durch den entstehenden Wasserdampf Eingang finden. Gleichzeitig musste der Wirkungsgrad der Verbrennung in Abhängigkeit von den Raumöffnungen Berücksichtigung finden. Diese Schwierigkeiten führten dazu, dass bis heute die aus realen Bränden und Versuchen abgeleiteten Anwendungsraten für die Abschätzung des erforderlichen Volumenstroms an Löschwasser die einfachste und bisher auch sicherste Methode darstellt. In der Praxis hat sich für diese Abschätzungen eine Brandfläche, die auf die Grundfläche des brennenden Objektes bezogene ist, bewährt. Für diese einheitlichen, grundflächenbezogenen Brandflächen wurden die Anwendungsraten definiert.

Aus Versuchsbränden ist bekannt, dass sich bei dreidimensionalen Bränden eine grundflächenbezogene Massenverlustrate bestimmen lässt, die für mittlere Brandlasten bei ausreichender räumlicher Verteilung des Brandstoffes näherungsweise konstante Werte erreicht. Unter Verwendung dieser Vereinfachung kann eine tabellierte Massenverlustrate als Maß für die zeitlich abhängige Energiefreisetzung einer einheitlichen ebenen Brandfläche angesehen werden. Der Zusammenhang ist bereits in Gleichung (6) wiedergegeben. Setzt man voraus, dass der Heizwert eines Brandstoffes aufgrund unvollständiger Verbrennung nicht vollkommen freigesetzt wird, muss die HRR folgerichtig von einer größeren Brandfläche herrühren. Allgemein nutzbare Korrekturwerte für eine unvollständige Verbrennung in Räumen werden mit Werten von $k = 0,7$ bis $0,9$ angegeben.

6.5 Bestimmende Faktoren für die Einsatzgrenzen - Fazit

Die Einsatzgrenzen für die verschiedenen Einsatzszenarien der Feuerwehr werden durch die technische Ausrüstung, die verfügbaren Kräfte der Feuerwehren, den Zeitraum bis zum Beginn des Einsatzes und die Maßnahmen zur Minderung der Einsatzrisiken für die Einsatzkräfte bestimmt.

◆ Grenzen durch die technische Ausrüstung

- Der Ersteinsatz erfolgt in der Regel durch ein Löschfahrzeug (LF). Gruppenlöschfahrzeuge (1/8) verfügen über eine ausreichende Mannschaftsstärke, um den Einsatz zu realisieren. Die Bestückung der LF verfügt über Rettungstechnik, Lüftungsgeräte und Löschtechnik sowie über persönliche Schutzausrüstung, ausgenommen ausreichende Atemschutzgeräte.
- Staffellöschfahrzeuge führen keine ausreichenden Kräfte mit. Sie sind nicht geeignet, das verfügbare Löschwasser vollständig zu nutzen. Die technische Ausrüstung ist nicht ausreichend.
- Am Einsatzort können aufgrund der räumlichen Verhältnisse nicht mehr als maximal 2 Trupps vorgehen. Beide Trupps müssen das verfügbare Löschmittel optimal ausnutzen.
- Durch das verfügbare Löschwasser wird die Größe des beherrschbaren Brandobjektes bestimmt. Somit können die maximalen Brandflächen für brennbare feste Stoffe (HGV) 100 m^2 betragen, welche umgerechnet auf die HRR bei der Verbrennung von Holz einem Wert von etwa 33 MW und bei Kunststoffen einem Wert von etwa 84 MW entspricht. Bei brennbaren Flüssigkeiten und dem Einsatz von Schwertschaum mit AFFF-Schaummitteln kann eine Fläche von 150 m^2 (280 MW) beherrscht werden.
- Für größere Einsätze muss das zusätzliche Löschwasser über mobile Schlauchleitungen zugeführt werden. Zeit und Kräfte vervielfachen sich. Die Effizienz des Einsatzes sinkt im gleichen Maßstab.
- Einsätze bei Freisetzung toxischer Stoffe sind wenig effizient, weil die Maßnahmen zur Konsequenzminderung im Herabsetzen der Konzentration der toxischen Stoffe unter die Grenzwerte der Toxizität bestehen und nur mit großen Mengen an Luft zum Verdünnen

und großen Wassermengen zum Niederschlagen erreicht werden können. Die Maßnahmen sind zeit- und kraftaufwändig.

- ◆ Grenzen durch die verfügbaren Kräfte der Feuerwehren
 - Da i.d.R. bis auf wenige Ausnahmen die Gefahrenabwehr in Tunneln durch kommunale freiwillige Feuerwehren erfolgt, die nicht ausschließlich für den Tunnel aufgestellt sind, verfügt die Mehrzahl dieser Feuerwehren über eine Gruppe pro Schicht, in einigen Fällen sogar nur über eine Staffel. Mit der Gruppe kann das verfügbare Löschmittel vollständig ausgebracht werden, somit ist für den Ersteinsatz auch nicht mehr als eine Gruppe sinnvoll. Der Staffeleinsatz kann in der gegenwärtigen taktischen Führung nicht als vollwertig aufgefasst werden. Der taktische Einsatz der Staffel müsste neu definiert und die Grenzen dieses Einsatzes festgelegt werden.
 - Die Nachforderung von Kräften muss in jedem Fall externe Kräfte der im Territorium verantwortlichen Feuerwehren einbeziehen, welche die Ablösung und notwendige technische Dienste, wie Gasschutz, Dekontamination und Versorgung Verletzter übernehmen.
- ◆ Grenzen aus der Einsatzzeit
 - Sowohl bei Freisetzungen toxischer Stoffe als auch bei Bränden spielt die Zeit bis zum Beginn der Maßnahmen zur Konsequenzminderung durch die Feuerwehren eine entscheidende Rolle. Je näher der Einsatzbeginn an die Zeit des Ereignisbeginns heranrückt, desto geringer sind die Faktoren der Ereignisentwicklung, wie Konzentration an toxischen Stoffen, Größe der toxischen Wolke, Größe der Brandfläche, Gastemperatur des Brandes, HRR, Wärmestrahlung, Aufheizung des Tunnels und der darin befindlichen Fahrzeuge. Das Ereignis kann in seiner Entwicklungsphase bekämpft und damit leichter beherrscht werden.
 - Es sollten Zeiten zwischen 6 und 8 Minuten für alle Ereignisorte in einem Tunnel angestrebt werden. Die Zeiten können länger sein, wenn im Tunnel eine Brandbekämpfungsanlage vorhanden ist.
- ◆ Grenzen aus der Risikominimierung für die Einsatzkräfte
 - Grundsätzlich müssen Einsatzkräfte beim Vorgehen am Einsatzort einen Löschwasserstrom von mindestens 400 l/min verfügbar haben.
 - Die Einsatzkräfte müssen vor toxischen Stoffen und Rauchgasen sicher geschützt sein. Die sich aus der verfügbaren Atemluft ergebenden Einsatzgrenzen sind zu beachten
 - Die Einsatzkräfte benötigen Wärmestrahlenschutz sowie Chemikalienschutz. Beide Schutzanzügen besitzen zeitliche Grenzen beim Einsatz.
 - Zum Schutz vor Strahlungswärme und erhöhter Raumtemperatur ist 1/3 der verfügbaren Löschwassermenge zur Kühlung der Umgebung einzusetzen.

6.6 Einsatzgrenzen bei stationären Brandbekämpfungsanlagen

Als stationäre Anlagen zur Brandbekämpfung in Tunneln haben sich international folgende Typen bewährt, die in Sektionen unterteilt sind und sektionsweise in Betrieb genommen werden:

- ◆ offene Sprinkleranlagen,
- ◆ offene Schaumspinkleranlagen,
- ◆ Wassernebelanlagen,
- ◆ CAFS-Schaumlöschanlagen.

Alle stationären Anlagen können automatisch oder durch die Tunnelleitstelle unmittelbar nach einem Unfall mit Brandfolge mit einer oder mehreren Sektionen in Betrieb gesetzt werden. Sie entfalten ihre Wirksamkeit bereits zu Beginn der Entwicklungsphase des Brandes. Dem Brand wird bereits in dieser Phase ein wesentlicher Teil der Energie durch Kühlung entzogen. Dies führt

zu einer verlangsamt bzw. behinderten Brandentwicklung. Das Stadium des Vollbrandes kann in den meisten Fällen nicht mehr erreicht werden. Somit muss die Feuerwehr nach Eintreffen am Brandherd nicht mehr den Vollbrand, sondern in der Regel einen Brand bekämpfen, der dem sonst erst nach längerer Bekämpfungszeit erzielten niedergeschlagenen Flammenbrand (knock down) entspricht. Bei Bränden kann damit ein deutlich geringeres Brandszenario die Folge sein und die Entwicklung nur noch zu HRR's von 10 bis 15 MW führen. Die Vorteile für die Feuerwehr sind vor allem in den deutlich geminderten Flammenhöhen, der geringen Wärmestrahlung, der Eingrenzung des Brandherdes und der geringeren Rauchentwicklung zu sehen.

Die Wirksamkeit stationärer Brandbekämpfungsanlagen wird entscheidend durch den Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme nach dem Ereignis bestimmt. Die Ursachen ungehinderter Brandentwicklung können vielschichtig sein, als wichtigste sollten hier genannt sein:

- Der Brand wird durch ein Fahrzeug bereits in geringer bis mittlerer Ausdehnung in den Tunnel hinein transportiert. Die Zündung der brennbaren Stoffe kann damit bereits vor einem längeren Zeitraum erfolgt sein. Bei verdeckter Ladung (Plane, Metallverkleidung) kann der Brand im Moment der Entdeckung im Tunnel bereits eine hohe Energie abgeben.
- Der Brand ereignet sich nicht sofort, aber es treten flüssige Stoffe aus, die eine Lache bilden. Die Zündung erfolgt erst nach einiger Zeit, allerdings mit Stichflamme bzw. mit leichter Explosion.
- Das Ereignis wird nicht sofort durch die Brandmeldetechnik erfasst.
- Auf das Ereignis wird nicht sofort reagiert.

Brandbekämpfungsanlagen werden aus diesem Grund nicht im Stadium der Brandausbreitung, sondern im Stadium einer bestimmten fortgeschrittenen Entwicklungsphase untersucht. Solche Entwicklungsphasen werden durch die bereits beschriebenen Designfeuer-Kurven wiedergegeben. Es wird damit eine reale Wirksamkeit der Löschanlage bei einer definierten Brandentwicklung zugrundegelegt.

Die aus den ersten Tunnelbrandversuchen im Offenegg-Tunnel [Ingason 2006] abgeleiteten Gefährdungen durch stationäre Brandbekämpfungsanlagen, die sich im Wesentlichen auf mögliche Rückzündungen gelöschter Brandflächen mit explosionsartigem Charakter beziehen, können für offene Schaumspinkler und CAFS-Schaumanlagen ausgeschlossen werden, wenn dem Löschwasser grundsätzlich AFFF-Schaummittel zugesetzt wird. Selbst beim Einsatz von Mehrbereichsschaummitteln bleibt während der Beschäumungszeit mit einer stationären Anlage der Schaum so wirksam, dass eine Rückzündung mit Explosion freigesetzter Rauchgase auszuschließen ist. Während der gesamten Phase der Brandbekämpfung muss die stationäre Anlage am Brandherd in Betrieb bleiben. Die zusätzlichen Sektionen können zu Beginn des Einsatzes der Feuerwehr abgeschaltet werden, um ausreichend Löschwasser zur mobilen Brandbekämpfung zur Verfügung zu haben. Die Feuerwehr kann sich damit auf die Bekämpfung einzelner Brandherde, tiefsitzender Glutnester und verdeckter Brandflächen konzentrieren.

Von Wassernebel-Anlagen kann das Feuer in den meisten Fällen nicht gelöscht werden, es verbleibt aber ebenfalls in einem Stadium der Brandentwicklung. Allerdings ist nach längerer Zeit auch mit größeren Flammen zu rechnen. Trotzdem stellen sich dadurch für die Feuerwehren Bedingungen ein, die deutlich günstiger sind als die bei einem vollentwickelten Brand. Das betrifft sowohl die Umgebungstemperaturen als auch die Strahlungsentwicklung im Raum. Es wäre auch denkbar, dass stationäre Brandbekämpfungsanlagen dazu dienen, den Kräftebedarf der Feuerwehren einzuschränken bzw. deren Einsatzzeit zu verlängern. Diese grundsätzliche Möglichkeit dient allerdings nicht zur schnellstmöglichen Beseitigung der Gefahren im Tunnel. Sie dient vor allem nicht dazu, die Zielstellungen der Gefahrenbeseitigung im Hinblick auf das Überleben von Personen im Tunnel, die Erhaltung des Tunnelgebäudes in seiner inneren Struktur und die Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren.

Stationäre Brandbekämpfungsanlagen besitzen keine Wirksamkeit gegenüber Explosionen von brennbaren Gaswolken.

Bei Freistrahlbländen an Lecks von Tanks mit brennbaren Flüssigkeiten sollten Schaum- und CAFS-Löschanlagen nicht betrieben werden, weil die Gefahr des Ablöschens des Freistrahls mit nachfolgender Explosion der Gase besteht. Wassernebel-Anlagen können dagegen durchaus eine Kühlung der unmittelbaren Umgebung erzielen und bei Flüssiggasen die Entstehung eines BLEVE stark hinauszögern bzw. unter Umständen auch verhindern. Die stationäre Berieselung bei großen Unfällen mit Flüssiggasen gehört praktisch zu den wenigen Maßnahmen einer Konsequenzminderung.

Für Freisetzungen mit Schadgasen können die stationären Anlagen einen Beitrag zur Durchmischung der Gase mit Luft und damit zur Verdünnung und bei löslichen Gasen auch zum Niederschlagen eines Teils der Gase liefern.

7 Arbeitsvorschriften bei Einsätzen in Tunneln

7.1 Zielstellung der Arbeitsvorschriften

Arbeitsvorschriften, die auf taktischen Erfahrungen für verschiedene Einsatzszenarien basieren, ermöglichen es, bei den Tunnelfeuerwehren einen gleichen Standard in der Ausführung von Einsätzen zu realisieren. Die Ausbildung kann an vergleichbaren Einsatzszenarien ausgeführt werden. Die Arbeitsvorschriften müssen einen bindenden Charakter für die Einsätze haben. Werden allerdings Mängel oder effizientere Lösungen im Einsatz gefunden, dann sollten diese nach genauer Prüfung der Sachlage zur Überarbeitung der Arbeitsvorschriften führen. Es sollte beabsichtigt werden, dass ein Qualitätsmanagement innerhalb der Feuerwehren auf- und ausgebaut wird, dem allgemein anerkannte Regeln, Erfahrungen aus der Praxis (Best Practice) und neue Erkenntnisse der Forschung zugrundegelegt werden.

7.2 Standard-Einsatz-Regeln Tunnel (SER)

In diesem Kapitel werden taktische Grundlagen für jedes Einsatzszenario aus der Sicht der Literatur und der Erfahrungen aus Versuchen aufgestellt. Diese SER sollten zunächst von den Feuerwehren erprobt werden. Ergeben sich in der praktischen Handhabung neue Erkenntnisse oder weitere Erfahrungen, sollten diese Erfahrungen schriftlich fixiert werden und in einem Arbeitskreis, bestehend aus Mitgliedern der für Tunnel zuständigen Feuerwehren, diskutiert und zur Einarbeitung in die Arbeitsvorschriften vorgeschlagen werden. Die Fortschreibung der Arbeitsvorschriften sollte dem Landesverwaltungsamt obliegen.

| | | | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|--|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel I - 01 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Allgemeine Grundsätze | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Zielstellung

- ◆ Die Arbeitsvorschrift enthält die wesentlichen Vorgaben und Voraussetzungen für die Realisierung von Einsätzen der Feuerwehr in Tunneln.

2. Grundsätzliches

- ◆ In Tunneln müssen sich Personen, die an Ereignissen beteiligt sind oder sich in unmittelbarer Nähe aufhalten, selbst retten. Ausnahmen bilden nur solche Personen, die bewegungsunfähig oder eingeschlossen bzw. eingeklemmt sind. Die Feuerwehr kann selbst bei einer Einsatzzeit von 6 bis 8 Minuten nicht alle diese Personen retten. Dies ist nur bei solchen Ereignissen möglich, die keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Personen haben. Bei Bränden und Freisetzungen toxischer Stoffe hat der Einsatz der Feuerwehr bei der Personenrettung nur wenig Aussicht auf Erfolg.
- ◆ Ereignisse in Tunneln sind gegenüber Ereignissen im Freien oder in Gebäuden sowohl in ihrer Entwicklung als auch in ihrer Beseitigung deutlich gefährlicher. Die Ursachen hierfür sind im Bauwerk und seiner Ausführung begründet. Besonderen Einfluss auf die Ereignisse haben:
 - Querschnitt,
 - Länge,
 - beidseitige Portale,
 - normale und zwangsgeführte Belüftung,
 - Verkehrsaufkommen,
 - Anteil an Schwerlasttransporten (HGV),
 - Zulassung von Gefahrgütern.

3. Vorgaben für den Einsatz

- ◆ Es ist erforderlich, den Ereignissen in ihrer Entwicklungsphase entgegen zu treten. Die Entstehungsphase liegt in einem Zeitraum von 8 bis 10 Minuten nach Eintritt des Ereignisses. Empfohlen wird eine Einsatzzeit¹ von 6 bis 8 Minuten
- ◆ Die Kräfte des ersten Abmarsches müssen in der Lage sein, allen wesentlichen Ereignissen zu begegnen und den vorgehaltenen Löschmittelvorrat auszulasten.
- ◆ Es müssen grundsätzlich und ohne Ausnahme die wirksamsten Varianten der Ereignisbekämpfung zum Einsatz kommen.
- ◆ Maßnahmen des Erstangriffs mit Geräten, die für kleine Ereignisse in der Entwicklungsphase gedacht sind, dürfen nur dann verwendet werden, wenn eine weitere Entwicklung des Ereignisses sicher ausgeschlossen werden kann und eine Gefährdung der Einsatzkräfte nicht gegeben ist.

¹ Einsatzzeit ist hier die Zeit vom Entstehen des Ereignisses bis zum Einsatz der Konsequenzminderungsmaßnahmen der Feuerwehr

- ◆ Bei allen Einsätzen ist das Risiko der Gefährdung der Einsatzkräfte abzuschätzen und Maßnahmen für einen sicheren Rückzug der Kräfte zu berücksichtigen.
- ◆ Grundsatz ist, dass alle Maßnahmen schnell und von vornherein auf die mögliche Eskalierung des Ereignisses abgestimmt sind. Jede nachträgliche Korrektur im Aufbau der Maßnahmen zur Bekämpfung oder Konsequenzminderung bedeutet Zeitverlust und ist vermeidbar.
- ◆ Die Sicherheit der Einsatzkräfte steht bei allen Entscheidungen im Vordergrund. Je nach Szenario muss die erforderliche Einsatzbekleidung sowie Spezialausrüstung verfügbar sein. Als Spezialausrüstung ist vor allem Schutzbekleidung für den Wärmestrahenschutz und Chemikalienschutz (bei Gefahrgütern) sowie der komplette Atemschutz für alle Kräfte zu sehen.
- ◆ Beim Atemschutz ist zu beachten, dass die Einsatzzeiten berücksichtigt werden und ausreichend Gasflaschen zur Verfügung stehen.
- ◆ Bei Langzeitatemschutzgeräten sind die Pausenzeiten zu beachten.

| | | | | | |
|----------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel II - 1.1 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Unfallszenario 1 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Zwei Pkw sind zerstört. An einem Fahrzeug lässt sich eine Tür nicht öffnen. Eine Person ist eingeklemmt. Bei beiden Fahrzeugen steckt der Zündschlüssel. Ein Motor läuft noch, beim zweiten Fahrzeug ist die Zündung aktiviert, jedoch der Motor läuft nicht. Es gibt Glasbruch und die Fahrzeuge sind beide stark verbeult. An mehreren Stellen treten Flüssigkeiten am Fahrzeug aus. Es ist nicht zu erkennen, wo sich die Leckstellen befinden.

Zielstellung ist die Bergung der Personen und die Sicherung der Unfallstelle.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Verletzungsgrad der Person und Zustand der Ansprechbarkeit feststellen, Notwendigkeit und Möglichkeit der Erstversorgung feststellen
- ✓ Beseitigung unmittelbarer Gefahrenquellen
Motor und Zündung abschalten, auf Ausströmgeräusche achten, Batterie abklemmen (wenn möglich)
- ✓ Sicherung der Unfallstelle vor weiteren Gefahren
Verkehrsabsicherung, Sicherung vor möglicher Brandentwicklung

3. Einsatzablauf

- ✓ Festlegung des Ablaufs der Rettungsmaßnahme und der Verwendung von Rettungsgeräten
- ✓ Sicherung des Fahrzeuges gegen Lageveränderungen
- ✓ Ansetzen des Rettungsgerätes
Weitere Verletzungsgefahr der Person ausschließen, Vermeiden von Lageveränderungen des Fahrzeuges während der Arbeitsphase, Vermeiden von Funkenschlag oder Zerstörung insbesondere im Tankbereich, an Gasbehältern, an Kühlung und Bremsen
- ✓ Bergen der Person
Vermeiden von weiteren Verletzungen, Versorgung der Person und Abtransport von der Unfallstelle
- ✓ Sicherung des Unfallortes vor weiteren Gefahren
Standesicherheit der Fahrzeuge, Überprüfung der Lecks nach weiterer Freisetzung von Stoffen, Aufnahme der organischen Flüssigkeiten, Entfernung des kontaminierten Chemikalienbinders
- ✓ Übergabe an Rettungsdienst

| | | | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel II - 2 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Unfallszenario 2 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In den Unfall sind zwei Lkw oder ein Lkw und ein Pkw verwickelt. Zwei Personen sind eingeklemmt bzw. eingequetscht. Durch den Unfall ist der Tank des Lkw beschädigt und die brennbare Flüssigkeit bildet eine Lache auf der Fahrbahn. Ein Lkw liegt auf der Seite. Teile der Ladung sind heruntergefallen und könnten gefährliche Stoffe freisetzen.

Zielstellung ist die Bergung der Personen und die Sicherung der Unfallstelle

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Verletzungsgrad der Person und Zustand der Ansprechbarkeit feststellen, Notwendigkeit und Möglichkeit der Erstversorgung feststellen
- ✓ Beseitigung unmittelbarer Gefahrenquellen
Motor und Zündung abschalten, auf Ausströmgeräusche achten, Leck abdichten evtl. Flüssigkeit auffangen, Batterie abklemmen (wenn möglich)
- ✓ Sicherung der Unfallstelle vor weiteren Gefahren
Verkehrsabsicherung, Sicherung vor möglicher Brandentwicklung
- ✓ Lage der Fahrzeuge prüfen

3. Einsatzablauf

- ✓ Festlegung der Prioritäten für den Einsatzablauf
- ✓ Entscheidung zu der zu verwendenden Technik
- ✓ Entscheidung zu evtl. nachzufordernder Technik
- ✓ Sicherung des Fahrzeuges gegen Lageveränderungen
- ✓ Ansetzen des Rettungsgerätes
Weitere Verletzungsgefahr der Personen vermeiden, Vermeiden von Lageveränderungen des Fahrzeuges während der Arbeitsphase, Vermeiden von Funkenschlag oder Zerstörung insbesondere im Tankbereich, an Gasbehältern, an Kühlung und Bremsen, Achten auf Veränderung der Ladung
- ✓ Bergen der Personen
Vermeiden von weiteren Verletzungen, Versorgung der Person und Abtransport von der Unfallstelle
- ✓ Sicherung des Unfallortes vor weiteren Gefahren
Standesicherheit der Fahrzeuge, evtl. umgekipptes Fahrzeug aufrichten, Fahrzeuge auseinanderziehen, Überprüfung der Lecks nach weiterer Freisetzung von Stoffen, Aufnahme der organischen Flüssigkeiten, Entfernung des kontaminierten Chemikalienbinders
- ✓ Übergabe an Rettungsdienst

| | | | | |
|--------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel II - 3 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Unfallszenario 3 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In den Unfall sind ein Bus und ein Lkw verwickelt. Es sind eine Vielzahl von Verletzten und Schwerverletzten vorhanden. Mehrere Personen können sich nicht bewegen. Einige Personen sind eingeklemmt.

Der Tank des Busses ist in Mitleidenschaft gezogen. Eine Flüssigkeitslache befindet sich unter dem Bus. Im Bereich des Lkws tritt ebenfalls Flüssigkeit aus, wobei dessen Tank aber unbeschädigt ist, so dass es sich hier um Brems-, Hydraulik- oder Kühlflüssigkeit handeln kann. Die Ladung des Lkws ist auf die Fahrbahn gefallen und die Verpackung wurde teilweise zerstört. Flüssige Stoffe sind nicht erkennbar.

Zielstellung ist es, Personen zu bergen und eine Notversorgung vorzunehmen sowie die Unfallstelle zu sichern, um keine Folgereaktionen zuzulassen

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Eingangstüren öffnen und fixieren,
- ✓ Verletzungsgrad der Person und Zustand der Ansprechbarkeit feststellen, Notwendigkeit und Möglichkeit der Erstversorgung feststellen
- ✓ Beseitigung unmittelbarer Gefahrenquellen,
Motor und Zündung abschalten, auf Ausströmgeräusche achten, Leck abdichten evtl. Flüssigkeit auffangen, Batterie abklemmen (wenn möglich),
- ✓ Sicherung der Unfallstelle vor weiteren Gefahren,
Verkehrsabsicherung, Sicherung vor möglicher Brandentwicklung, Sicherung der Ladung
- ✓ Lage der Fahrzeuge prüfen

3. Einsatzablauf

- ✓ Festlegung der Prioritäten für den Einsatzablauf
- ✓ Entscheidung zu der zu verwendenden Technik
- ✓ Entscheidung zu eventuell nachzufordernder Technik
- ✓ Sicherung des Fahrzeuges gegen Lageveränderungen
- ✓ (wenn erforderlich) Ansetzen des Rettungsgerätes
Weitere Verletzungsgefahr der Personen vermeiden, Vermeiden von Lageveränderungen des Fahrzeuges während der Arbeitsphase, Vermeiden von Funkenschlag oder Zerstörung insbesondere im Tankbereich, an Gasbehältern, an Kühlung und Bremsen, Achten auf Veränderung der Ladung
- ✓ Bergen der Personen
Vermeiden von weiteren Verletzungen, Versorgung der Personen und Abtransport von der Unfallstelle

- ✓ Sicherung des Unfallortes vor weiteren Gefahren

Standsicherheit der Fahrzeuge, evtl. umgekipptes Fahrzeug aufrichten, Fahrzeuge auseinanderziehen, Überprüfung der Lecks nach weiterer Freisetzung von Stoffen, Aufnahme der organischen Flüssigkeiten, Entfernen des kontaminierten Chemikalienbinders

- ✓ Übergabe an Rettungsdienst

| | | | | | |
|---------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel III - 1 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freisetzungsszenario 1 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Nach einem Unfall wird aus einem definierten Leck ein volatiler Stoff freigesetzt (Freisetzungsrate $V_{St} = 4 \text{ l/min}$, Gesamtmasse maximal 100 kg), welcher sich ohne weitere Folgereaktionen ausbreitet. Der Stoff kann ein unter Druck stehendes brennbares Gas, ein nichtbrennbares aber toxisches Gas, eine brennbare, leichtsiedende Flüssigkeit oder eine toxische Flüssigkeit sein. Kombinationen der Eigenschaften bei Gasen oder Flüssigkeiten sind möglich.

Zielstellung ist die Eindämmung des Lecks, die Beseitigung der toxischen oder explosiblen Konzentration.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Identifizierung des Stoffes (wenn möglich) aus sicherer Entfernung
- ✓ Erkennen der Situation am Fahrzeug
Art des Lecks, Größe, Art des Freistrahls, Lachenbildung am Boden, Größe der Lache
- ✓ Festlegen der Absperrzone

3. Einsatzablauf

- ✓ Festlegen der Prioritäten für den Einsatzablauf
Schutzmaßnahmen und Sicherungsmaßnahmen, Maßnahmen der Konsequenzminderung, Abdichten des Lecks, Schließen des Ventils der Gasflasche
- ✓ Ausrüstung der Einsatzkräfte mit Schutzanzügen, Schutzhauben,
- ✓ Bei brennbaren Gasen Zündquellen beseitigen
- ✓ Einsatz von Belüftungsgeräten zum Verdünnen
Eigene Ventilatoren einsetzen, Strahllüfter nur bei nichtbrennbaren Gasen und Dämpfen nutzen (Geräte sind meist nicht explosionsgeschützt)
- ✓ Einsatz von Sprühstrahlen zum Niederschlagen (Absorbieren) und Ablenken der toxischen Gase am Leck als Vorbereitung für das Abdichten
- ✓ Abdichten des Lecks mit entsprechendem Material
- ✓ Nachreinigen der Umgebung von Gasresten
- ✓ Durchführen von Gasmessungen im unmittelbaren Austrittsbereich und am Tunnelportal
Die Belüftungsmaßnahme soll erst nach Durchgang der Gaswolke oberhalb des Portals und Abklingen der toxischen Konzentration unter den Grenzwert beendet werden
- ✓ Freigabe der defekten Behältnisse zum Abtransport nach Sicherung der Leckstelle oder Aufnahme in einem sicheren Transportbehälter. Abtransport durch Spezialisten veranlassen

| | | | | | |
|-----------------------------------|---|--------------------------------|---|---|------------------------------|
| SER Tunnel III - 2 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freisetzungsszenario 2 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Nach einem Unfall ist ein großes Leck entstanden, aus dem flüssiges Gas oder volatile Flüssigkeit austritt. Die Freisetzungsrates beträgt anfänglich etwa 40 l/min und die Gesamtmasse 5000 kg. Zum Austritt aus dem Leck kommt eine Lachenverdampfung und in der Anfangsphase eine Flashverdampfung der Flüssigkeit hinzu. Der Siedepunkt des Flüssiggases liegt im Minustemperaturbereich. Sowohl Gas als auch Flüssigkeit können toxisch, brennbar oder beides sein.

Zielstellung ist es, die Leckstelle so schnell als möglich zu erreichen und abzudichten bzw. Konsequenzminderungsmaßnahmen solange aufrecht zu erhalten, bis Gas oder Dampf gefahrlos abgeleitet ist.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Schutzbekleidung und Atemschutz tragen
- ✓ Erkennen der Situation am Fahrzeug

Art des Lecks, Größe, Art des Freistrahls, Lachenbildung am Boden, Größe der Lache, Sichtbarkeit der Gaswolke (Nebelbildung weist auf Ammoniak oder Gase mit Siedepunkten deutlich unter 0°C hin, grünliche Wolke – Chlor)

- ✓ Identifizierung des Stoffes aus sicherer Entfernung (wenn möglich)
- ✓ Zusätzliche Ausrüstung mit Gasschutzanzügen
- ✓ Die Sicherung der Einsatzstelle besitzt Vorrang
- ✓ Entscheidung zum Hinzuziehen von Spezialisten (TUIS – Feuerwehren)

3. Einsatzablauf

- ✓ Aufenthalts- und Bereitstellungsbereich durch Kontrollmessungen absichern
- ✓ Bei brennbaren Gasen sind alle Zündquellen zu beseitigen
- ✓ Maßnahmen der Konsequenzminderung bei brennbaren Gasen grundsätzlich aus sicherer Deckung heraus vornehmen, Einsatzkräfte dürfen sich nicht in der Tunnelröhre aufhalten
- ✓ Lüftungsgeräte so einsetzen, dass sie nicht direkt durch Druckwellen erfasst werden (Lutten benutzen)
- ✓ Erst wenn sich die Intensität des Gasaustrittes verlangsamt und am Tunnelportal Konzentrationen unterhalb der unteren Zündgrenze (Explosionsgrenze) gemessen werden, kann unter dem Schutz kompakter Sprühstrahlen der Versuch zum Abdichten des Lecks erfolgen. Der Einsatz ist nur durch erfahrene Spezialisten möglich.
- ✓ Gase sind häufig schwerer als Luft und können sich an tiefer gelegenen Stellen ansammeln, z.B. in Hohlbordrinnen, im Versorgungsteil unter der Fahrbahn, in Versorgungs- oder Betriebseinrichtungen – Gasmessungen in diesen Bereichen nach dem Ereignis durchführen
- ✓ Am luvseitigen Portal ist ebenfalls zu überprüfen, ob sich Schwergase ansammeln können. Wenn notwendig ist zusätzliche Belüftung anzufordern.

- ✓ Belüftung ist bei toxischen Gasen direkt möglich. Strahlventilatoren ohne Explosionsschutz sind verwendbar.
- ✓ Zusätzlich Sprühwasser zur Absorption löslicher Gase einsetzen – es wird in freier Umgebung bei gut löslichen Stoffen nur wenig Gas absorbiert ($< 0,1\%$)
- ✓ Beide Maßnahmen (Belüftung und Absorption) sind wenig effizient, weil die Grenzkonzentrationen für toxische Gase meist im ppm Bereich ($1\% = 10.000$ ppm) liegen und damit die Verdünnung sehr groß sein muss, deshalb müssen beide Möglichkeiten genutzt werden.
- ✓ Bei toxischen Gasen kann bei stabiler Belüftung und unter Sprühwasser der Versuch zum Abdichten des Lecks unternommen werden. Dazu sind ein Einsatztrupp und ein Rettungstrupp unmittelbar vor Ort zu bringen
- ✓ Nach erfolgreichem Abdichten den Behälterinhalt umpumpen oder den Behälter in einem sicheren gasdichten Container unterbringen und durch Spezialisten abtransportieren lassen.

| | | | | |
|---------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel III - 3 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freisetzungsszenario 3 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Nach einem Unfall wird die gesamte Ladung des Transportfahrzeuges freigesetzt. Der Gasbehälter oder Tank kollabiert. Es kommt bei Flüssiggasen zu einer Flashverdampfung in der Anfangsphase, in der je nach Siedetemperatur der Flüssiggase bei Normaldruck 30 bis 50 % der freigesetzten Menge schlagartig verdampfen. Daran anschließend erfolgt die Lachenverdampfung der siedenden Flüssigkeit.

Bei Flüssigkeiten bildet sich eine Lache aus. Die Verdampfungsrate der Lache richtet sich nach dem Siedepunkt der Flüssigkeit, der Lachengröße und der Windgeschwindigkeit im Tunnel.

Sowohl das Gas als auch die Flüssigkeit können toxisch, brennbar oder beides sein.

Zielstellung ist es, die Gase und Dämpfe aus dem Tunnelbauwerk zu entfernen und gefahrlos in die Atmosphäre zu bringen

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Das Betreten des Tunnels ist nicht möglich. Die Lage muss über die Videoüberwachung eingeschätzt werden.
- ✓ Stoffart und Tankvolumen feststellen.
- ✓ Am luvseitigen Portal sind großräumige Absperrungen vorzunehmen.
- ✓ Sämtliche Zündquellen innerhalb des Absperrbereiches sind zu entfernen
- ✓ Abschätzen der möglichen Explosionsgefahr in weiterer Umgebung (z.B. mit Disma)
- ✓ Auch in diesen Bereichen sind die Zündquellen zu beseitigen
- ✓ Messungen im Luftstrom ermöglichen, die Stoffart zu bestimmen. (Atemschutz und Gasschutz anlegen)
- ✓ Sofort Spezialkräfte anfordern. (TUIS- Feuerwehr)

3. Einsatzablauf

Brennbare Gase

- ✓ Entscheidung über Evakuierungsmaßnahmen im unmittelbaren Bereich des Tunnelportals
Informieren über Grenzkonzentrationen (untere Zündgrenze, Explosionswirkung der Gaswolke, ERPG oder AEGL – Wert)
- ✓ Bei brennbaren Gasen die Konsequenzminderung im Bereich des Tunnelportals durchführen
Belüftungsgeräte nicht direkt in Strömungsrichtung anordnen, keine Tunnelventilation durch nicht explosionsgeschützte Ventilatoren vornehmen.
- ✓ Begleitung der Belüftungsmaßnahmen durch Konzentrationsmessungen im engeren und weiteren Ausbreitungsbereich der Gaswolke

- ✓ Eventuell Einsatz von weiteren Belüftungsgeräten in Bereichen mit hoher Wohndichte, um Evakuierungen zu beschränken

Toxische Gase

- ✓ Bei toxischen Gasen ist die Tunnelbelüftung einsetzbar und sollte maximal genutzt werden.
- ✓ Es ist zu beachten, dass der toxische Abluftstrom am luvseitigen Tunnelportal in höhere atmosphärische Schichten gelenkt werden muss
- ✓ Die Ausbreitung von Schwergasen ist zu verhindern. Dazu können auch Sprühstrahlen oder Hydroschilde eingesetzt werden. Hydroschilde eignen sich auch zur Umlenkung des Abgases in höhere Luftschichten.
- ✓ Konzentration an der Austrittsstelle und in Ausbreitungsrichtung der Gaswolke messen. Exakte Messpunkte entsprechend der Form der Gaswolke einrichten und besetzen. Messungen ständig erfassen und in Diagrammen aufzeichnen.
- ✓ Nach Absinken der Konzentration unter die untere Zündgrenze bzw. den ETW-Wert am luvseitigen Portal können sich die Einsatzkräfte der Unfallstelle unter massivem Schutz von Sprühstrahlen nähern.
- ✓ Im Tunnel kann es trotz intensiver Belüftung gefährliche Areale geben, insbesondere im Bodenbereich, innerhalb der Schlitzrinnen, in Versorgungskanälen.
- ✓ Vor Ort ist zu entscheiden, ob mit den Aufräumarbeiten begonnen werden kann.

Brennbare und toxische Flüssigkeiten

- ✓ Flüssigkeiten bilden nach Freisetzung sofort Flüssigkeitslachen. Die Größe der Lachen wird durch die Gesamtmasse und die Ausflussgeschwindigkeit aus dem Behälter bestimmt.
- ✓ Ein wesentlicher Teil der Flüssigkeit wird über die Hohlbordrinnen und das Drainagesystem aus dem Tunnel abgeleitet.
- ✓ Das Auffangsystem außerhalb des Tunnels kann damit zum Problem werden und ist zu berücksichtigen.
- ✓ Im Tunnel besteht Explosionsgefahr durch Flüssigkeitsdampf. Tunnellüftung nicht in Betrieb nehmen, wenn die Lüfter keinen Explosionsschutz aufweisen.
- ✓ Wenn möglich, aus sicherer Entfernung die Flüssigkeitslache mit Schaum abdecken.
- ✓ Auch den Bereich der Schlitzrinnen mit Schaum abdecken.
- ✓ Nach Abdecken mit Schaum versuchen, die verbleibenden Reste der Flüssigkeit in sichere Behälter umzupumpen. Dazu Spezialisten und Spezialtechnik einsetzen (TUIS – Feuerwehr)
- ✓ Reinigen der Fahrbahndecke und Ausspülen der Drainageleitung, weil sich in den Siphons brennbare Flüssigkeit ansammelt, die nur mit viel Wasser oder durch Abpumpen entfernt werden kann.
- ✓ Bei allen Arbeiten mögliche Explosionsgefahr beachten und die Toxizität des Stoffes berücksichtigen.
- ✓ Die Flüssigkeit im Auffangsystem fachgerecht entsorgen lassen. Bei Flüssigkeiten mit niedrigem Siedepunkt eventuell mit Schaum abdecken. Bei toxischen Flüssigkeiten in jedem Fall eine Schaumabdeckung vorsehen und die Konzentrationen in der Luft bestimmen. Steigen die Konzentrationen an, dann muss die Schaumschicht erneuert werden. Das günstigste Schaummittel ist AFFF-Schaum.

| | | | | | |
|--------------------------|---|----------------------------|--|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel IV - 1 |  | Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Brandszenario 1 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In Folge eines Ereignisses brennen 1 bis 2 Pkw. Die Brandleistung beträgt dann etwa 5 MW pro Pkw. Die Umrechnung auf eine vergleichbare Brandfläche ergibt für einen Pkw ¹ ca. 21 m². Die Brandbekämpfung wird behindert durch nichtbrennbare Flächen (Blech, Glas), die eine gezielte Applikation des Löschmittels verhindern und einen Angriff aus kurzer Distanz erfordern. Es ist die Gefahr des Auslaufens brennbarer Flüssigkeiten mit nachfolgender Zündung und die Möglichkeit der Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge gegeben.

Zielstellung ist es, die Brandbekämpfung so effizient wie möglich ohne Ausbreitung auf andere Objekte durchzuführen

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Sind Personen im Fahrzeug eingeklemmt, diese nach Möglichkeit unverzüglich bergen.
- ✓ Bei großer Brandausbreitung im Brandraum mit Verletzten wird unmittelbare Brandunterdrückung erforderlich.
- ✓ Möglichkeiten der Brandausbreitung abschätzen
- ✓ Einsatz der Tunnellüftung zur Sichtverbesserung und Temperaturabsenkung im Angriffsbereich

3. Einsatzablauf

- ✓ Löschangriff mit einem C-Strahlrohr (mindestens 400 l/min) vornehmen, wenn sicher ist, dass keine weitere Brandausbreitung erfolgen kann.
- ✓ Die Schlauchleitung sollte so ausgelegt sein, dass jederzeit ein weiteres Rohr angeschlossen werden kann.
- ✓ Der Angriff erfolgt mit maximal verfügbarem Durchsatz direkt auf die Oberflächen der brennbaren Stoffe. Nach einer Applikationsdauer von ca. 30 s, in der alle Flächen benetzt sein müssen, wird der Wasserstrom unterbrochen.
- ✓ Nach Erkennen der noch am Brand beteiligten Oberflächen, diese gezielt beaufschlagen, dabei ist das Strahlrohr immer zu bewegen, um an den Oberflächen die Ausbildung von Wasserdampfschichten zu unterbinden und den Dampf abzuführen
- ✓ Achtung beim Öffnen eines brennenden Motorraums; Flammen können herausschlagen
- ✓ Bei längeren Bränden kann Magnesium gezündet werden (Motorgehäuse, Zylinder, Verkleidungen). Diese Brände können nicht mit Wasser gelöscht werden.
- ✓ Benzinlachen, insbesondere unter den Fahrzeugen mit Schaum abdecken. Dafür AFFF-Schaummittel verwenden, um größere Sicherheit gegen Rückzündungen zu haben.

¹ mittlerer Heizwert 20 MJ/kg, Abbrandrate 1kg/m²-min bzw. 0,017 kg/m²-s

- ✓ Schaumeinsatz ist auch im Fahrgastraum effizient, weil Schäume über längere Zeiträume wirksam sind und das Material der Sitze (Polyetherschäume) sehr schnell abbrennen kann.
- ✓ Neuere Pkw können mit Propangas betrieben sein. Die Gastanks befinden sich im Kofferraum. Achtung Propangas-Freistrahlen aus Lecks sollten nicht gelöscht werden, weil sonst Explosionsgefahr besteht. Freistrahlen nur dann löschen, wenn die Flasche noch mit dem Schraubventil verschließbar ist.
- ✓ Gleiche Probleme treten bei Caravans auf, die auch größere Flaschen mit Propangas mitführen können.
- ✓ Brände in geschlossenen Fahrgasträumen können große Mengen brennbarer Gase freisetzen, die beim Öffnen der Türen oder Fenster schlagartig mit Stichflammenbildung durchzündend.
- ✓ Nach Ablöschen der Fahrzeuge nochmals auf Zündquellen überprüfen, Batterien abklemmen.
- ✓ Auslaufende oder ausgelaufene Flüssigkeiten mit Chemikalienbinder aufnehmen und entsorgen.
- ✓ Fahrzeuge den Abschleppdiensten übergeben

| | | | | |
|--------------------------|--|--|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel IV - 2 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Brandszenario 2 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In Folge eines Ereignisses brennen ein großer Pkw (Van) und ein normaler Lkw mit Ladung. Bei Erreichen des Vollbrandstadiums besitzt der Brand eine HRR von 30 bis 40 MW. Das entspricht einer vergleichbaren Brandfläche für Holz als Brandstoff von 125 m² bis 157 m² (für Kunststoff als Brandstoff 36 m² bis 50 m²). Die Brandbekämpfung wird behindert durch die Tunnelmauern und auch durch brennbare Abdeckplanen des Lkw. Es besteht die Gefahr des Auslaufens brennbarer Flüssigkeiten mit nachfolgender Zündung. Die Möglichkeit der Brandausbreitung in Strömungsrichtung der Rauchgase ist gegeben.

Zielstellung ist es, den Brand unter Nutzung aller im ersten Angriff verfügbaren Kräfte zu löschen.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Sind Personen im Fahrzeug eingeklemmt, diese nach Möglichkeit unverzüglich bergen.
- ✓ Bei erfolgter Brandausbreitung im Brandraum mit Verletzten wird unmittelbare Brandunterdrückung erforderlich.
- ✓ Möglichkeiten der Brandausbreitung abschätzen
- ✓ Einsatz der Tunnellüftung zur Sichtverbesserung und Temperaturabsenkung im Angriffsbereich – Achtung zusätzliche Luft führt zu höheren HRR und höherer Strahlung! Abstimmen der Lüftung mit den Einsatzmöglichkeiten ist erforderlich

3. Einsatzablauf

- ✓ Entscheidung über grundlegende Prioritäten zum Einsatz – Strahlungsschutz, Kühlung Atemschutz, Brandausbreitung
- ✓ Das Brandszenario erfordert alle Kräfte des ersten Gruppenlöschfahrzeuges und es wird die gesamte verfügbare Löschwassermenge einzusetzen sein.
- ✓ Nutzung der insgesamt verfügbaren Löschmittelmenge einplanen und dementsprechend die Schlauchleitungen verlegen.
- ✓ Vornahme eines stationär aufstellbaren Sprühstrahlrohres zur Kühlung und Minderung der Wärmestrahlung. Das Rohr sollte so ausgerichtet sein, dass die gesamte Querschnittsfläche des Tunnels mit dem Sprühstrahl ausgefüllt wird und die Vorderseite des Brandobjektes erreicht wird.
- ✓ Der Einsatz sollte so erfolgen, dass durch die Kräfte vor Ort natürliche und mobile Deckungen für einen wirkungsvollen Strahlungsschutz genutzt werden können.
- ✓ Nach der Inbetriebnahme des Rohres wird der Trupp zurückgezogen und das Rohr ohne Besatzung betrieben.
- ✓ Die maximale Kühlwassermenge sollte 400 l/min nicht übersteigen.
- ✓ Das restliche Löschmittel kann auf zwei Strahlrohre (C) verteilt oder mit einem Strahlrohr (B) abgegeben werden. Beim Einsatz des B-Strahlrohres muss ein Angriffstrupp mit 3 Kräften eingesetzt werden.

- ✓ Die zum Löschen eingesetzten Strahlen müssen in der ersten Phase des Brandes möglichst schnell die gesamte Brandfläche überstreichen, ohne dabei auf einen direkten Löscherfolg an einer Stelle zu achten. Zielstellung ist es, möglichst viel Energie an den Oberflächen der brennenden Stoffe zu binden, um den intensiven Flammenbrand zu stoppen. (Flames knock down)
- ✓ Es muss besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit einer Brandausbreitung in Leerrichtung gelegt werden. Das bedeutet, dass die Strahlrohre auch in der Tiefe des Brandes wirksam werden und durch Kühlung ein Übergreifen auf andere Fahrzeuge verhindern.
- ✓ Nachdem der intensive Flammenbrand beendet ist, können einzelne Brandherde gezielt bekämpft werden. Es ist zu beachten, dass der Sprühstrahl ständig bewegt werden muss, um die heißen Flächen sicher abzukühlen. Dampffilme zwischen den Tropfen und den heißen Oberflächen (Leidenfrost'sches Phänomen) müssen abgeführt werden.
- ✓ Neben brennbaren festen Stoffen können im Brandfall auch größere Mengen an brennbaren Flüssigkeiten, vorzugsweise Treibstoffe der Fahrzeuge, in die Brandentwicklung eingreifen. Es ist deshalb grundsätzlich angeraten, mit einem Zusatz an AFFF-Schaummittel zu arbeiten. Mit Schaummittelzusätzen wird auch die Rückzündung der Brandstoffe erschwert. Es ist nicht unbedingt erforderlich, mit Schaumrohren zu arbeiten, weil auch eine geringe Verschäumung der versprühten Schaummittellösung wirksam ist. Gleichzeitig werden eventuelle Brandausbreitungen mit brennbaren Flüssigkeiten über die Schlitzrinnen verhindert.
- ✓ Lkw-Planen können dem Löschwasser für längere Zeiträume Widerstand entgegensetzen und ein Niederschlagen der Flammen verhindern. Um dies zu verhindern, müssen kräftige Vollstrahlen eingesetzt und die Wirkung der Planen beseitigt werden.
- ✓ Bei längeren Bränden kann Magnesium gezündet werden (Motorgehäuse, Zylinder, Verkleidungen). Diese Brände können nicht mit Wasser gelöscht werden. Als wirksames Löschmittel kann nur Löschpulver aus dem mitgeführten Handfeuerlöscher (P6 oder P12) genutzt werden.
- ✓ Propangasflaschen können bei Beflammung schlagartig Gas freisetzen und Stichflammen (Freistrahlen) ausbilden. Diese Freistrahlen nicht ablöschen sondern möglichst ausbrennen lassen – Explosionsgefahr !
- ✓ Lkw-Ladungen bergen die Möglichkeit der Ausbildung verdeckter Brände, insbesondere zwischen der Ladung und den Tunnelwänden. Diese Brände sind nur sicher zu bekämpfen, wenn die Brandflächen direkt beaufschlagt werden können. Teilweise ist die Fracht mechanisch auseinander zu reißen und erst danach löscherbar.
- ✓ Die Zahl der Kräfte vor Ort sollte aufgrund der beschränkten Räumlichkeit und der bevorzugten Angriffsmöglichkeit von der Luvseite möglichst nur durch maximal zwei Löschtrupps vorgenommen werden. Der Einsatz weiterer Trupps in der Spätphase der Brandbekämpfung zu Hilfsleistungen ist denkbar.
- ✓ Zusätzliches Löschwasser sollte nur eingeplant werden, wenn sich eine Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge nicht verhindern lässt.
- ✓ Vor Ort sollte eine Wärmebildkamera zur Verfügung stehen, um insbesondere nach dem Niederschlagen der Flammen verdeckte Brandflächen und -herde zu erkennen.
- ✓ Nach dem Ablöschen der Glimmbrände nochmals mittels Wärmebildkamera die Brandstelle absuchen. Mögliche Zündquellen entfernen und die ausgelaufenen Flüssigkeiten mit Chemikalienbinder aufnehmen.
- ✓ Lüftung gezielt als Rauchabzug verwenden und die Schlitzrinnen spülen.
- ✓ Die Unfallfahrzeuge dem Abschleppdienst übergeben

| | | | | |
|--------------------------|--|--|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel IV - 3 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Brandszenario 3 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In Folge eines Ereignisses brennt ein großer Lkw. Bei Erreichen des Vollbrandstadiums nach etwa 10 Minuten besitzt der Brand eine HRR von 100 bis 200 MW. Das entspricht einer vergleichbaren Brandfläche für Holz als Brandstoff von 200 m² bis 600 m² (für Kunststoff als Brandstoff von 120 m² bis 250 m²). Bei voller Beladung mit brennbaren Stoffen (> 30 t) wäre die zu erwartende HRR noch höher.

Zielstellung ist es, die Brandausbreitung durch Sofortmaßnahmen einzuschränken und nach Verfügung ausreichender Kräfte die Brandbekämpfung vorzunehmen

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

Grundsätze

- ✓ Personen, die in dem Fahrzeug eingeklemmt oder bewegungsunfähig sind, können aufgrund der herrschenden Wärmestrahlung und der Temperaturentwicklung nicht mehr gerettet werden.
- ✓ Eine einzelne Feuerwehr ist selbst bei Einsatzzeiten von 6 bis 8 Minuten mit einem Gruppenlöschfahrzeug nicht mehr fähig, die Brandentwicklung innerhalb der Entwicklungsphase zu verhindern. Es kommt zum Vollbrand.
- ✓ Ein Großbrand dieser Ausdehnung ist auch unter normalen Bedingungen nur mit einem hohen Aufwand an Kräften und Mitteln beherrschbar.
- ✓ Der verfügbare Volumenstrom an Löschmittel von 1200 l/min ist nur unter günstigen Bedingungen ausreichend, so dass eine mobile Löschwasserversorgung notwendig wird.

Objektbezogene Schwerpunkte

- ✓ Möglichkeiten der Brandausbreitung in der Planung der Löschwassermengen berücksichtigen.
- ✓ Einsatz der Tunnellüftung zur Sichtverbesserung und Temperaturabsenkung im Angriffsbereich ist nur notwendig, wenn sich Rauchgas luvseitig ausbreitet (backlayering). Achtung, zusätzliche Luft führt zu höheren HRR's und höherer Strahlung! Abstimmen der Lüftung mit den Einsatzmöglichkeiten ist erforderlich.

3. Einsatzablauf

- ✓ Entscheidung über grundlegende Prioritäten zum Einsatz –Löschwasserversorgung, Kräfte und Mittel, Strahlungsschutz, Kühlung, Atemschutz, Brandausbreitung.
- ✓ Zusätzliche Kräfte zum Aufbau einer mobilen Löschwasserversorgung anfordern
- ✓ Die einseitige Angriffsrichtung von der Luvseite der Strömung erfordert Wurfweiten bis zu 45 m. Da allen angegebenen Wurfweiten eine optimale Wurfparabel bei einem Winkel von 32° zugrunde liegt, deren Scheitelpunkt in einem Tunnel aufgrund der geringeren Tunnelhöhe nicht zu erreichen ist, wird die maximale Wurfweite etwas geringer ausfallen.
- ✓ Vornahme eines stationär aufstellbaren Sprühstrahlrohres zur Kühlung und Minderung der Wärmestrahlung.

- ✓ Es muss mit einem Abstand von der Flammenfront von 15 m zu Beginn der Brandbekämpfung gerechnet werden.
- ✓ Die Aufbauten und äußeren Auskleidungen der Fahrzeuge verhindern das direkte Aufbringen des Löschwassers auf den Brandherden.
- ✓ Schwerpunkt der Angriffsrichtung für die Einsatzkräfte bleibt die rauchfreie Luvseite des Tunnels. Es ist nicht möglich, mehr als zwei Einsatztrupps von dieser Seite her einzusetzen.
- ✓ Die eingesetzten Handrohre sind so zu führen, dass in der ersten Phase möglichst alle am Brand beteiligten Oberflächen mit Wasser beaufschlagt werden, um die im Brandstoff gespeicherte Wärmeenergie optimal zu binden und die Flammenhöhen abzusenken (knock down)
- ✓ Erst nachdem Flammen nur noch vereinzelt und mit geringer Höhe vorhanden sind, kann mit der Bekämpfung der einzelnen Brandherde begonnen werden.
- ✓ Die Einsatzkräfte müssen dabei zuerst die Kühlrohre und die vorhandenen automatisch arbeitenden Löschrohre in Richtung Brandherd versetzen, ehe sie sich mit ihren Handrohren dem Brandherd nähern.
- ✓ Neben brennbaren festen Stoffen können im Brandfall auch größere Mengen an brennbaren Flüssigkeiten, vorzugsweise Treibstoffe der Fahrzeuge, in die Brandentwicklung eingreifen. Es ist deshalb grundsätzlich angeraten, mit einem Zusatz an AFFF-Schaummittel zu arbeiten. Mit Schaummittelzusätzen wird auch die Rückzündung der Brandstoffe erschwert.
- ✓ Je näher die Einsatzkräfte dem Brandherd kommen, desto gezielter kann das Löschwasser auf die Oberflächen der brennbaren Stoffe aufgebracht werden. Dabei gilt immer der Grundsatz, je mehr Flammen oder Glutherde, desto stärker muss die Wasserverteilung vorgenommen werden. Erst nach Abführen des Hauptanteils der Energie kann man sich auf einzelne Brandherde konzentrieren.
- ✓ Der Einsatz wird zusätzlich durch stationär aufgestellte Rohre unterstützt, die automatisch arbeiten und in einem definierten Winkel seitlich geschwenkt werden. Damit kann das für die Kühlung verwendete Strahlrohr der automatischen Kühlwasserabgabe vor dem Brandherd einen Teil der Brandbekämpfung übernehmen. Die Eindringtiefe des Strahlrohres für die Brandbekämpfung muss maximal sein und sollte darauf ausgerichtet sein, alle brennbaren Stoffe zu beaufschlagen.
- ✓ Im Falle einer sehr hohen Fahrzeug-Dichte im Tunnel und der damit zu erwartenden Ausbreitung des Brandes in Leerichtung muss am nächsten Zugang leeseitig ein Kühlrohr eingesetzt werden. Das Prinzip der automatischen Kühlwasserabgabe muss beibehalten werden. Mit zunehmender Abkühlung kann das Rohr schrittweise in Richtung des Brandherdes bewegt werden.
- ✓ Nachdem der Einsatz erste Wirkungen zeigt, sollte versucht werden, auch von der Leeseite automatisch arbeitende Strahlrohre oder die Kühlrohre möglichst nahe an den Brandherd heranzuführen, um damit eine weitere Brandausbreitung zu unterbinden.

| | | | | |
|-------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel V - 1 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Flüssigkeitsbrand-szenario 1 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

In einem Ereignis wird ein Tankfahrzeug mit brennbarer Flüssigkeit beschädigt. Aus einem Leck tritt brennbare Flüssigkeit direkt auf die Fahrbahn aus. Das Leck ist so groß, dass sich eine brennende Lache am Fahrzeug mit einer Fläche von 10 m² ausbildet. Diese Fläche liefert eine Brandleistung von etwa 17 MW. Das Fahrzeug wird nur teilweise durch die Flammen unterfeuert. Die Gefahr der Vergrößerung der Leckrate besteht aber.

Zielstellung ist es, die Flüssigkeitslache zu löschen und das Leck abzudichten

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Sind Personen im Fahrzeug eingeklemmt, diese nach Möglichkeit unverzüglich bergen.
- ✓ Einschätzen, ob der Tankwagen durch Flammen des Lachenbrandes direkt in Mitleidenschaft gezogen wird.
- ✓ Einschätzen, ob neben dem Leck zusätzliche Verbeulungen oder andere Schwachstellen zu erkennen sind.
- ✓ Abklären, ob über die Schlitzrinnen brennbare Flüssigkeit abläuft.
- ✓ Einschätzen, ob eine weitere Brandausbreitung möglich ist.

3. Einsatzablauf

- ✓ Entscheidung über grundlegende Prioritäten zum Einsatz – Strahlungsschutz, Kühlung Atemschutz, Brandausbreitung.
- ✓ Vornahme eines stationär aufstellbaren Sprühstrahlrohres zur Kühlung und Minderung der Wärmestrahlung.
- ✓ Dem Wasser des Strahlrohres zur Kühlung wird ein AFFF-Schaummittel zugemischt.
- ✓ Bei Ausrichtung des Kühlwasserstrahls auf den Tank wird dieser gekühlt und das abfließende Löschwasser kann auf der Flüssigkeitslache bereits wirksam werden, obwohl die Verschäumung des Kühlwassers gering ist.
- ✓ Mit einem Handschaumrohr wird die Wirkung des Kühlrohres unterstützt. Das ist notwendig, weil die Fließfähigkeit des Schaums auf Flüssigkeitslachen geringer ist, als auf Brandflächen mit einer dicken Schicht an Brandstoff.
- ✓ Die Brandbekämpfung ist auf die Flüssigkeitslache, die Schlitzrinnen (wenn bereits brennbare Flüssigkeit abgelaufen ist) und die Kaskade am Leck des Tanks zu orientieren.
- ✓ Nachdem die Flüssigkeitslache durch eine Schaumschicht abgedeckt ist, gilt es die vorhandenen Flammen am Leck zu löschen. Dies kann bei kleinen Flammen mittels Schaumrohr und bei größeren Flammen mit Sprühstrahl erfolgen.
- ✓ Da der Löschvorgang im oberen Bereich begonnen und nach unten fortgesetzt werden muss, besteht die Gefahr des Aufreißens der Schaumdecke und damit des Eintritts der Rückzündung. Die Nachschäumung auf der Flüssigkeitslache ist erforderlich.
- ✓ Nach dem Löschen der Kaskade wird das Leck unter weiterer Kühlung und mit Schaumabgabe manuell mit entsprechenden Dichtungen und Bandagen geschlossen.

- ✓ Erst nach Abschluss der Abdichtungsarbeiten kann die Schaumabgabe beendet werden.
- ✓ Nachsorgearbeiten beziehen sich auf die Aufnahme der brennbaren Flüssigkeiten mit Chemikalienbinder und die Reinigung der Schlitzrinnen (evtl. Explosionsgefahr)

| | | | | |
|-------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel V - 2 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Flüssigkeitsbrand-szenario 2 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Ein Tankfahrzeug wird bei einem Ereignis so beschädigt, dass ein großes Leck entsteht, welches eine Flüssigkeitslache von 100 m² erzeugt. Die HRR dieser Brandfläche beträgt etwa 170 MW. Es besteht die unmittelbare Gefahr der vollständigen Zerstörung des Tanks und damit der schlagartigen Freisetzung von mindestens 20 m³ brennbarer Flüssigkeit, die sofort zünden würde. Ein größerer Anteil brennbarer Flüssigkeit läuft durch die Schlitzrinnen ab. Die ablaufende Flüssigkeit kann nur bis zum nächsten Siphon zur Brandausbreitung beitragen.

Zielstellung ist es, das Leck ohne Gefährdung der eingesetzten Kräfte abzudichten, die Flammenwirkung auf den Tank zu minimieren und eine Brandausbreitung durch ablaufende Flüssigkeit zu verhindern.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Sind Personen im Fahrzeug eingeklemmt, ist die Möglichkeiten für eine Bergung abzuschätzen. Eventuell ist eine sofortige Brandunterdrückung zu veranlassen.
- ✓ Abklären, ob der Tankwagen durch Flammen des Lachenbrandes direkt in Mitleidenschaft gezogen wird.
- ✓ Abklären, ob neben dem Leck zusätzliche Verbeulungen oder andere Schwachstellen zu erkennen sind.
- ✓ Abklären, ob brennbare Flüssigkeit über die Schlitzrinnen abläuft.
- ✓ Einschätzen, ob eine weitere Brandausbreitung möglich ist.

3. Einsatzablauf

- ✓ Entscheidung über grundlegende Prioritäten zum Einsatz – Strahlungsschutz, Kühlung Atemschutz, Brandausbreitung.
- ✓ Vornahme eines stationär aufstellbaren Sprühstrahlrohres zur Kühlung und Minderung der Wärmestrahlung. Der Ort der Aufstellung richtet sich nach der Wärmestrahlung. Im laufenden Betrieb muss das Kühlrohr weiter in Richtung des Brandherdes versetzt werden. Damit soll das Kühlwasser zusätzlich für die Tankkühlung und für das Abdecken der Flüssigkeitslache durch den abfließenden Sprühschaum eingesetzt werden.
- ✓ Dem gesamten Löschwasser, auch dem des Strahlrohres für die Kühlung, wird AFFF-Schaummittel zugemischt.
- ✓ Die noch verfügbare Löschwassermenge sollte auf zwei Schaumrohre mit je 400 l/min Durchsatz verteilt werden. Diese Maßnahme ist effizienter, weil damit eine leichtere Beschäumung der Lachenfläche realisiert werden kann. Auf der Flüssigkeitslache breitet sich der Schaum langsamer aus.
- ✓ Die hohe Leckrate bedingt, dass ein großer Anteil brennbarer Flüssigkeit über die Schlitzrinnen in das Wasserauffangbecken vor dem Tunnel gelangt. Hier besteht die Gefahr der Zündung.
- ✓ Das Auffangbecken sollte abgesperrt werden und durch eine Brandwache überwacht werden.

- ✓ Es ist darauf zu achten, dass auch die Schlitzrinnen mit beschäumt werden, weil durch Brände in diesem Bereich eine Brandausbreitung gegeben ist.
- ✓ Ist die Flüssigkeitslache gelöscht, kann der tatsächliche Schaden am Tank beurteilt werden und die Maßnahmen zum Abdichten des Lecks vorbereitet werden.
- ✓ Unmittelbar vor der Leckabdichtung muss die brennende Kaskade gelöscht werden. Dies kann durch die Nutzung des Kühlrohres mit Sprühstrahl erfolgen. Die Kühlung des Tanks unmittelbar im Leckbereich muss weiter aufrecht erhalten werden. Erst wenn die Temperaturen im Leckbereich keine Rückzündung mehr zulassen (Wärmebildkamera), kann das Abdichten des Lecks erfolgen
- ✓ Das Abdichten des Lecks muss schnell und sachgemäß erfolgen. Gefährdungen durch Rückzündung sind durch weiteres Vorhalten des Kühlrohres und der Schaumrohre zu begegnen.
- ✓ Am Ende des Einsatzes muss für die Reinigung der Schlitzrinnen und eine Entsorgung der brennbaren Flüssigkeit im Auffangbecken gesorgt werden.

| | | | | |
|-------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel V - 3 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Flüssigkeitsbrand-szenario 3 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Bei einem Ereignis wird der Tank eines Tankfahrzeuges vollständig zerstört und die gesamte brennbare Flüssigkeit schlagartig freigesetzt. Die entstehende Brandfläche wird mit 300 m² angesetzt. Von dieser wird eine HRR von etwa 300 MW abgegeben. Dieser Wert könnte allerdings auch höher (bis 500 MW) angesetzt werden. Es ist bei diesem Szenario damit zu rechnen, dass sich ein pulsierender Brandverlauf einstellt und die Flammenlängen bzw. Durchzündungen größere Entfernungen vom Brandherd erreichen. Dadurch kann sich eine schnelle Brandausbreitung in Strömungsrichtung einstellen. Gleichzeitig werden auch die Siphons in den Schlitzrinnen überfordert sein und die Brandausbreitung durch abfließende Flüssigkeit unterstützen. Der verfügbare Volumenstrom an Löschwasser ist für eine Brandfläche von maximal 150 m² ausreichend. Es muss eine mobile Löschwasserversorgung aufgebaut werden.

Zielstellung ist es, im ersten Angriff eine Konsequenzminderung im Hinblick auf die Brandausbreitung vorzunehmen und nach ausreichender Verfügbarkeit von Löschwasser und Schaummittel den Brand zu bekämpfen.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Nach Erkennen der Sachlage sind sofort Nachforderungen an Technik und zusätzlichen Kräften erforderlich. Das betrifft das Einrichten einer Wasserförderung über lange Wegstrecken, die Zuführung von Schaummittel (mindestens 3 m³) und zusätzliche Pumpen.

3. Einsatzablauf

- ✓ Nach Möglichkeit ist auf der Leeseite des Brandherdes ein stationäres Strahlrohr so aufzustellen, dass die Sprühhichtung entgegen der Strömung wirkt. Das vorzugsweise als Kühlwasser wirksame Löschwasser sollte eine Zumischung von AFFF-Schaummittel erhalten.
- ✓ Mit Hilfe dieses Rohres kann zunächst die Brandausbreitung auf den Bereich zwischen dem Tank und dem nächsten Zugang begrenzt werden.
- ✓ Nun sollte versucht werden, das Rohr bei laufender Wasserabgabe in Richtung des Brandherdes zu verschieben. Je näher das Rohr an den Brandherd herangeführt werden kann desto mehr wird die Brandausbreitungsmöglichkeit verringert.
- ✓ Der Einsatz findet auf der Leeseite bei stärkster Verqualmung statt und sollte mit allen verfügbaren Sicherungsmaßnahmen abgesichert werden.
- ✓ Danach sollte die gleiche Maßnahme auf der Luvseite des Brandes realisiert werden. Hier ist infolge der geringeren Verqualmung mit sehr hoher Wärmestrahlung zu rechnen, so dass die Einsatzkräfte mit ausreichendem Strahlungsschutz vorgehen müssen. Mit der Installation des stationären Kühlrohres wird der Löschangriff vorbereitet. Gleichzeitig ist das vom Kühlrohr an der Brandstelle ankommende Wasser bereits löschwirksam.
- ✓ Erst wenn eine ausreichende Löschwassermenge zu Verfügung steht, kann der Löschangriff vorgetragen werden.

- ✓ Mit zunehmender Zeit wird ein großer Teil der brennbaren Flüssigkeit über die Schlitzrinnen in das äußere Auffangbecken für Regenwasser abgeflossen sein. Es kann bereits zu Beginn der eigentlichen Brandbekämpfung eine Restablösung im Auffangbecken erforderlich werden.
- ✓ Da mit einer Brandausbreitung in Leerichtung zu rechnen ist, können dort weitere Fahrzeuge in Brand geraten. Die Brandbekämpfung wird insofern schwierig, weil sie sich über die eigentliche Unfallstelle hinaus ausdehnen kann und die Einsatzkräfte in jedem Fall die ausgebrannten bzw. gelöschten Fahrzeuge im Rücken haben. Die Gefahr einer Rückzündung ist hoch. Gleichzeitig gasen die heißen Teil weiter aus, so dass die Atmosphäre einen hohen Anteil an Pyrolysegasen enthält.
- ✓ Es wird aber deutlich, dass eine Feuerwehr einen Brand dieser Ausdehnung nicht beherrschen kann. Die notwendigen Kräfte und Mittel nachzuführen erfordert Zeit, die für die Bekämpfung des Flüssigkeitsbrandes nicht zur Verfügung steht.
- ✓ Das Auffangbecken außerhalb des Tunnels muss während der Brandphase abgesichert werden. Zündquellen in der Nähe sind zu entfernen. Eventuell sollte im Bedarfsfall die Fläche vorsorglich beschäumt werden.

| | | | | |
|--------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel VI - 1 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freistrahlszenario 1 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Durch ein Ereignis wird ein Fahrzeug mit Druck- oder Flüssiggasbehältern beschädigt. Es kommt zur Zündung des austretenden Gases. In der Folge des Ereignisses bildet sich ein Freistrahlszenario am Behälter aus. Die Größe des Lecks gibt ein Gasvolumen von 40 l/s frei. Dies entspricht bei vollständiger Verbrennung einer HRR von ca. 3,6 MW. Der Freistrahlszenario hat eine direkte Wirkung auf den Behälter und heizt diesen auf.

Es ist allerdings auch möglich, dass sich der Freistrahlszenario erst als Folgereaktion einer Gasexplosion ausbildet. Dieses Szenario wird hier nicht betrachtet.

Zielstellung ist, bei möglichst geringer Gefährdung das Leck abzudichten. Im Zeitraum des Abdichtens ist der Freistrahlszenario zu kühlen, jedoch nicht zu löschen.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Unter Druck stehende Freistrahlszenarios besitzen große Flammenlängen, die in der Lage sind, Behälter zu beflammen. Einschätzen, ob die Beflammung im konkreten Fall vorhanden ist und wie groß die Übertragungsfläche ist.
- ✓ Einschätzen, ob eine Belüftung die Flamme ablenken kann.
- ✓ Es ist der allgemeine Zustand des Behälters und dessen Volumen einzuschätzen oder festzustellen.

3. Einsatzablauf

- ✓ Eine Annäherung an den Behälter erfolgt nur soweit es notwendig ist. Vom Standort aus muss bei guter Deckung die Kühlung des Behälters und der Leckstelle möglich sein. Die Flamme darf nicht gelöscht werden.
- ✓ Bei kleinen Behältern kann ein freies Abbrennen des Vorrats die sicherste Variante sein.
- ✓ Vorbereitung der Abdichtungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der vorgefundenen Situation.
- ✓ Aufsetzen und Sichern der Abdichtungen am Ort. Erst dann ist die direkte Abdichtung vorzunehmen.
- ✓ Überprüfen des Behälters auf Transportsicherheit durch Spezialisten.
- ✓ Besteht keine Transportsicherheit mehr, muss der Behälterinhalt vor Ort umgepumpt werden. Dafür ist die TUIS-Feuerwehr anzufordern.
- ✓ Die Sicherung der Arbeiten bleibt Aufgabe der Tunnelfeuerwehr.

| | | | | |
|--------------------------|--|---|---------------------------------------|------------------------------|
| SER Tunnel VI - 2 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freistrahlszenario 2 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Durch ein Ereignis wird der Tank eines Flüssiggastransporters beschädigt. Die Leckstelle gibt Flüssiggas in einer Größenordnung von 1 kg/s frei, die als Freistrahls sowie als Flüssiggaslache verbrennen. Die Gesamtleistung dieser Verbrennungen beträgt bei vollständigem Umsatz 45 MW. Der Tank des Fahrzeuges wird stark belastet und die Möglichkeit der Ausbildung eines BLEVE besteht. Die vorhandene Gesamtmasse an Flüssiggas beträgt mindestens 10 t.

Zielstellung ist, die Ausbildung eines BLEVE zu verhindern

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Ausmaß der Flüssigkeitslache und Größe der Freistrahlsflamme feststellen.
- ✓ Abklären, ob eine direkte Beflammung des Tanks erfolgt.
- ✓ Einschätzen, ob eine weitere Brandausbreitung möglich ist.
- ✓ Abschätzen der Zeit bis zum Erreichen des BLEVE.

3. Einsatzablauf

- ✓ Die freigesetzte Energie kann nur dann ausreichend vom Tank entfernt werden, wenn die Flammen durch die Belüftung vom Tank ferngehalten werden können.
- ✓ In diesem Fall besteht die Möglichkeit einen Einsatz mit weitreichenden Schaumrohren vorzubereiten, um die Flüssiggaslache abzudecken. Es ist allerdings bekannt, dass Schäume bei Flüssigkeiten mit Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes nur eine minimale Löschwirkung besitzen.
- ✓ Aus diesem Grund muss vor allem der Flüssigkeitstank mit Schaum beaufschlagt werden, um diesen für längere Zeit kühlen zu können. Achtung, die Einsatzkräfte müssen nach Installation des stationär aufstellbaren, mechanisch bewegbaren Schaumstrahlrohres den Tunnel wieder verlassen, weil die Gefahr eines BLEVE vorhanden ist.
- ✓ Die Wirkung des Schaums kann die Zeit der Aufheizung soweit verlängern, dass der Behälter sich entleeren kann, ohne das BLEVE-Stadium zu erreichen. Andere Einsatzvarianten sind durch die Feuerwehren nicht zu realisieren.

| | | | | |
|----------------------------------|--|---|---|------------------------------|
| SER Tunnel VI - 3 |  Freistaat Thüringen | Einsatzszenarien Tunnel Freistrahlszenario 3 | Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt | Dr. G. Pleß |
| | Erarbeitet: 31.12.2008 | Vorlage SER Tunnel 31.12.2008 | SER Tunnel 31.12.2008 | Fortschreibung 31.12.2010 |

1. Beschreibung des Szenarios

Durch ein Ereignis wird ein Flüssiggastankfahrzeug so beschädigt, dass der Tank aufreißt und das gesamte Flüssiggas mit einer Masse von mindestens 10 t freisetzt. Die sofortige Zündung führt in der ersten Phase zu einer Stichflammenbildung, bei der bis zu einem Drittel der verfügbaren Masse verbrennt. Die Stichflamme wird sich kurzzeitig in Strömungsrichtung durch den gesamten Tunnel ausbreiten. Zündungen von Fahrzeugen und Ladungen sind möglich. Für ungeschützte Personen besteht die Gefahr von Verbrennungen auf der Haut. Nach Abklingen der Flashverdampfung stellt sich eine intensive Lachenverbrennung ein, weil die Siedetemperatur des Flüssiggases unterhalb der Umgebungstemperatur liegt.

Zielstellung kann hier nur sein, für die Umgebung Maßnahmen zur Konsequenzminderung durchzuführen und die Wirkung auf Personen durch weiträumig Absperrungen zu minimieren.

2. Lageüberblick und Sofortmaßnahmen

- ✓ Ausmaß der Flüssigkeitslache und Größe der Freistrahlf Flamme feststellen.
- ✓ Abklären, ob im kollabierten Tank noch Flüssiggas enthalten ist.
- ✓ Abklären, ob eine Unterfeuerungen des kollabierten Tanks stattfindet.

3. Einsatzablauf

- ✓ Mit Hilfe der Belüftung ist zu versuchen, die eventuelle Unterfeuerung zu mindern.
- ✓ Die Flüssigkeit kann über die Schlitzrinnen möglicherweise auch in den Abwasserkanal eindringen. Deshalb sind Zündquellen im Bereich des Auffangbeckens zu entfernen.
- ✓ Gasmessungen in diesem Bereich und am leeseitigen Portal durchführen.
- ✓ Die Gaslache muss möglichst schnell ausbrennen (Belüftung).
- ✓ Danach ist der Tunnel zu belüften, um einen wesentlichen Teil der Energie zu entfernen.

8 Literatur

- [3M 1992] 3M Deutschland GmbH: Light-Water AFFF Schaum Feuerlöschmittel, Broschüre mit Anwendungstechnischen Grundlagen, 1992
- [ADR 2007] Anlage zur Bekanntmachung der Neufassung der Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR), Anlagenband zum Bundesgesetzblatt Teil II Nr. 27 vom 14. September 2007, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, <http://www.bmvbs.de/>
- [Astra 2000] ASTRA/OFROU Bundesamt für Strassen: ASTRA Tunnel Task Force Schlussbericht, Nr: 2775, Bern, 23. Mai 2000
- [ASTRA 19001 2008] ASTRA 19 001 Sicherheitsmassnahmen gemäss Störfallverordnung bei Nationalstrassen, Bundesamt für Strassen ASTRA Abteilung Straßennetze Standards, Forschung, Sicherheit 3003 Bern, Bezugsquelle ASTRA, STRADOK, CH-3003 Bern , ASTRA 2008, www.astra.admin.ch
- [Babrauskas 1977] Babrauskas, V.: Estimating Large Pool Fire Burning Rates, Center for Fire Research, National Bureau of Standards, Gaithersburg, 1977
- [Baltzer et al. 2001] Baltzer, W. ; Riepe, W.; Locher, P.; Merz, E. H.: Risikoanalyse zum Transport gefährlicher Güter durch die Tunnelkette der BAB A71 im Thüringer Wald, Teilgutachten IV: Vergleich zwischen der Tunnelkette der BAB A71 und möglichen Umfahungsstrecken, Schlussbericht vom 1. Oktober 2001, Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Infrastruktur
- [BAM 2008] Bundesamt für Materialforschung und –prüfung: Tunnelkategorien, Tunnelbeschränkungscode http://www.tes.bam.de/tunnel/tunnel_kategorien_codes.htm, 2008-06-05
- [Bartknecht 1955] Bartknecht, W.: Explosionsablauf und Bekämpfungsmaßnahmen bei Staub- und Gasexplosionen in Behältern und Rohren , Chemie Ingenieur Technik - CIT, Vol 47, Jahrgang 1955, Ausgabe 6(S. 236-241)
- [Benichou 2005] Benichou, N.: *Technical Issues Involved in Developing Design Fires*, Fire Research Program , Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Workshop on Design Fires, 10 May 2005, National Research Council Canada, Ottawa, Ontario
- [Bettelini et al. 2003] Bettelini, M. ; Neuenschwander, H. ; Henke, A.; Gagliardi, M.; Steiner, W.: The Fire in the St Gotthard Tunnel of October 24, 2001, International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 49-68, Borås, Sweden, 20-21 November 2003
- [Blinov und Khudyakov 1957] Blinov, V.I. ; Khudyakov, G. N.: Certain Laws Governing Diffusion Burning of Liquids, *Academiia Nauk, USSR, Doklady* 113, 1094;1957

- [Bobert 2001] Bobert, M.: High Expansion Foam Systems for Inside Air – Literature Review and Fire Test, Brandforsk Project 609-971, SP Swedish Nationalö Testing and Research Institute, SP Fire Technology, SP Report 2001:01
- [Carvel 2004] Carvel, R.O.: Fire Size in Tunnels, Ph.D.; Heriot-Watt University, School of the Built Environment, Division of Civil Engineering, Riccarton, Edinburgh, EH14 4AS,
- [Carvel et al. 2005] Carvel, R.O.; Beard, A.N.; Jowitt, P.W. : Fire Spread Between Vehicles in Tunnels: Effects of Tunnel Size, Longitudinal Ventilation and Vehicle Spacing, Fire Technology, 41, 271–304, 2005
- [Davis 2000] Davis, S.: Fire Fighting Water: A Review of Fire Fighting Requirements. A New Zealand Perspective. Univers. of Canterbury, Christchurch, 2000
- [DiNenno et al. 1996] DiNenno, P.J.; Back, G.G; Leonhared, J.T.; Darwin, R.L.: Full Scale Tests of Water Mit Fire Suppression Systems for Navy Shipboard Machinery Spaces, Hughes Ass. Inc., NavalTechnology Center for Safety and Survivability, Naval Sea System Command, Washington 1996
- [Frintrup 1990] Cone – Calorimeter – Erprobung des Prüfverfahrens zur Bestimmung der Wärmeentwicklung nach ISO/DP 5660, Abschlussbericht Teil 1 bis 4, Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein Westfalen, 1990
- [GDV 2005] Merkblatt zum Brandschutz in Straßen-Tunnels, VdS 3502 : 2005-08 (01), VdS Schadenverhütung GmbH • Amsterdamer Str. 174 • D-50735 Köln
- [GEBE 2005] Der größte Gefahrgutunfall in Deutschland GEBE – Unfallmerkblatt 7, Der Gefahrgut-Beauftragte 16. Jahrgang, Heft 7, Juli 2005
- [Grimwood 2005] Grimwood, P.: Fire-fighting Flow-rate, Barnett (NZ) – Grimwood (UK) Formulae www.firetactics.com , London Fire Brigade (retired), Published January 2005
- [Haack 2001] Haack, A. : FIT – Fire in Tunnels; Technical Report – Part 1 Design Fire Scenarios, Thematic Network FIT European Community ‘Competitive and Sustainable Growth’ Contract n° G1RT-CT-2001-05017, 2001
- [Herzke und Mieling 2005] Herzke, K.; Mieling, I.: Erarbeitung eines Vorschlags für die zukünftige Regelung bezüglich Gefahrguttransporten auf der Tunnelkette BAB A 71 Auftraggeber: Thüringer Innenministerium, Auftragnehmer: HB – Verkehrsconsult GmbH, Feuerwehr Hamburg, Hamburg 2005
- [Home Office 1998] Out of the Line of Fire, Modernising the Standards of Fire Cover, Report of the Joint Committee on the Audit Commission Report to the Central Fire Brigades Advisory Councils, Fire and Emergency Planning Directorate, Home Office, UK, July, 1998, ISBN 1-84082-106-X
- [ITIG 2006] International Tunnelling Insurance Group (ITIG): Richtlinien zum Risikomanagement von Tunnelprojekten, Zürich Global Corporate, 2006

- [Ingason et al. 2001] Ingason, H.; Bergqvist, A.; Frantzich, H.; Hasselrot, K.; Lundström, S.: Planning Manual Fire Fighting and Rescue in Tunnels. Proceedings 4th International Conference on Safety in Road and Rail tunnels, Madrid 2-6 April 2001, p. 595-604
- [Ingason 2003] Ingason, H.: Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF), International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 31-47, Borås, Sweden, 20-21 November 2003
- [Ingason 2006] Ingason H.: Design Fires in Tunnels, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, Second International Symposium, Lausanne 2006, SP Swedish National Testing and Research Institute
- [Ingason 2006/1] Ingason, H.: Model Scale Tunnel Fire Tests; Sprinkler, Brandforskprojekt 406-021, SP Fire Technology SP REPORT 2006:56, SP Swedish National Testing and Research Institute, Borås 2006
- [Ingason und Lönnermark 2004] Ingason H. ; Lönnermark, A.: Recent Achievements Regarding Measuring of Time-Haet and Time-Temperature Development in Tunnels,SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, First International Symposium, Prague 2004
- [Kaiser et al. 2000] Kaiser, W; Rogazewski, P; Schindler, M; Steinbach, J.: Ermittlung und Berechnung von Störfallszenarien nach Maßgabe der 3. Störfallverwaltungsvorschrift, TÜV Anlagentechnik GmbH Berlin-Brandenburg, Technische Universität Berlin 2000, im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin
- [Kafka 2007] Kafka, G.: ADR/RID 2007, http://fcio.at/Admin/Docs/02_Kafka.pdf
- [Kämpf et al. 2001] Kämpf, K.; Heller, H.; Grotrian, J.; Riedle, H.; Vödisch, M.: Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und der Verkehrsmittelnutzung, Kurzfassung, FB Nr. 96.584/1999, Bundesministerium für Verkehr-, Wohnungs- und Bauwesen, Prognos Basel AG, 2001
- [Karagounis et al. 2007] Karagounis, C.; Sailer, T.; Spitra, S.; Weiland, N.: Exkursion zum Elbtunnel, Baubehörde Stadt Hamburg, 2007
- [KfV 2005] Sicherheitsvergleich Österreichischer Tunnels, Aktuelle KfV-Studie zeigt: Zu geringer Sicherheitsabstand und zu hohe Geschwindigkeit sind Hauptunfallursachen in Autobahn- und Schnellstraßentunnels, Presse-Information, Wien, am 10. Oktober 2005, Rückfragehinweis: Mag. Dolores Omann, Kuratorium für Verkehrssicherheit, Marketing & Kommunikation,
- [Kim 2006] Kim M. E.: A Study on Pulsation in Runehamar Tunnel Fire Tests with forced longitudinal Ventilation, Worcester Polytechnic Institute in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Fire Protection Engineering June 2006

- [Knoflacher et al. 2002]
Knoflacher, H.; Pfaffenbichler, P. C.; Nussbaumer, H.: Quantitative Risk Assessment of Heavy Goods Vehicle Transport Through Tunnels the Tauerntunnel Case Study, Institute for Transport Planning and Traffic Engineering, Vienna University of Technology, Gußhausstraße 30/231, A-1 040 Wien, International Conference "Tunnel Safety and Ventilation" 2002. Graz
- [Kohl et al. 2005] Kohl K. J. ; Kutz, M.; Wienecke F.: Die Wirkung von mobilen Abschottungs- und Belüftungsmaßnahmen bei der Rettung und Brandbekämpfung bei Tunnelbränden – Teil 2, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt , Heyrothsberge, Januar 2005 , FA-Nr. 42 (1/2003) H, ISSN 0170-0060
- [Kohl und Pleß 2007]
Kohl, K.J.; Pleß, G.: Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil I – Literaturstudie, Forschungsbericht Nr. 147 , Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge, Dezember 2007
- [Koinig 1999] Koinig H.: Referenzszenarien zur Richtlinie 96/82/EG, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie, Wien 1999, Allg. beeid. und gerichtl. zert. Sachverständiger, Technisches Büro für Technische Physik, Donaust. 101/1, 2344 Maria Enzersdorf
- [Lawson 1996] Lawson, J.R.: Firefighters Protective Clothing and Thermal Environments of Structural Fire Fighting, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 1996
- [Lemaire und Kenyon 2006]
Lemaire T.; Kenyon, Y.: Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel, Centre for Fire Research, TNO P.O. Box49, 2600 AA Delft, The Netherlands, Fire Technology, 42, 329–350, 2006
- [Liew et al. 1998] Liew, S. K. ; Deaves, D. M.; Blyth, A. G.: Eurotunnel HGV Fire on 18th November 1996 – Fire Development and Effects, Proc. 3rd Int. Conf. On Safety in Road and Rail Tunnels, Nice, France March 9-11, 1998, pp. 29-40
- [Lönnermark 2005]
Lönnermark, A.: On the Characteristics of Fires in Tunnels, Doctoral Thesis, Submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund 2005
- [Lönnermark und Ingason 2006]
Lönnermark, A.; Ingason, H.: Fire Spread and Flame Length in Large-Scale Tunnel Fires SP Swedish National Testing and Research Institute, Fire Technology, Box 857, SE-501 15, Borås, Sweden, Fire Technology, 42, 283–302, 2006
- [Macnamara 2008]
Macnamara, L: Three dead after blaze in Burnley Tunnel,
www.theaustralian.news.com.au/story/0,20867,21432697-2702,00.html
- [Mawhinney 1994]
Mawhinney, J. R. : Water Mist Suppression Systems May Solve an Array of Fire Protection Problems, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, NFPA Journal, Vol. 88, No. 3, 46-50, 52-54, 56-57, May/June 1994.

- [McGrattan 2005]
McGrattan K. B.: Numerical Simulation of the Caldecott Tunnel Fire, April 1982, Fire Research Division, Building and Fire Research Laboratory December 2005, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology
- [Memorial 1995] Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program, Comprehensive Test Report, Federal Highway Administration (FHWA), Massachusetts Highway Department (MHD), American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) and Bechtel/Parsons Brinckerhoff (B/PB), Central Artery/Tunnel Project, Nov. 1995
- [Natori et al. 2006]
Natori, A.; Kakae, N.; Kitahori, J.; Tsuchihashi, T.; Abe, T.; Nagaoka, T.; Ohmiya, Y.; Harada, K.: Development of a Simple Estimation Method of Heat Release Rate based on Classification of Common Combustibles into Category Groups, Fire Science and Technology, Vol. 25 No. 1(2006), pp. 31-34
- [OECD 2001] Safety in Tunnels, Transport of dangerous Goods Through Road Tunnels, Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, OECD 2001
- [Opstad und Stensaas 2006]
Opstad, K.; Stensaas J.P.: Fire Mitigation Measures, Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, Second International Symposium, Lausanne 2006
- [Persson 2002] Persson, M.: Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel -An Illustrative Example, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Brandteknik Lunds tekniska högskola Lunds universitet, Report 5096, Lund 2002
- [Pleiß und Kohl 1985]
Pleiß, G.; Kohl, K.-J.: „Löschintensität, ihre Bedeutung und Berechnung“ und „Neue Berechnungsgrundlagen für das Wasserlöschverfahren“ Unser Brandschutz (1985) 11, S. 3-8, Berlin, 1985
- [Pleiß und Seliger 1993]
Pleiß, G.; Seliger, U.: Optimierung der Erzeugung von Wasser-Abgasstrahlen zur Absorption von Schadstoffen bei Bränden und Havarien, Abschlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 13 RG 9110, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Instituts-Bericht Nr. 309, Heyrothsberge, 1993
- [Pleiß und Seliger 2000]
Pleiß, G.; Seliger, U.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung von Nachweismethoden und Schutzkonzepte für Störfälle in Chemikalienlagern (IV), Abschlußbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 01 RG 9510 / 4, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bericht Nr. 386, Heyrothsberge, 2000

- [Pleß und Wienecke 1998]
 Pleß, G.; Wienecke, F.: Ermittlung von Einsatzspektren und Wirkungsgraden des Aerosollöschverfahrens , Abschlussbericht Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 01-RG9404/6 Instituts-Bericht Nr. 370, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge Juli 1998
- [Pöttsch 2004] Pöttsch, M.: Risikobewertung des Transports von Chlor mit Binnentankschiffen auf dem Rhein unter besonderer Beachtung des Gefahrgutrechts, Dissertation Universität Wuppertal, Fachbereich Sicherheitstechnik, Wuppertal 2004
- [Promat 2008] Promat: Tunnel Fire Protection, A conversion from NFPA 502 standard to practical systems and tested solutions, Promat International NV, Bormstraat 24, Tisselt, BE – 2830 BELGIUM, <http://www.promat-tunnel.com>, info@promat-tunnel.com
- [RABT 2006] Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), Ausgabe 2006, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- [Rew und Deaves 1999]
 Rew, C.; Deaves, D.: Fire Spread and Flame Length in Ventilated Tunnels, a Model Used in Channel Tunnel Assessments, 1th Int. Conf. On Tunnel Fires an Escape From Tunnels, Lyon, France, May 5-7, 1999, pp. 397-406
- [Rhodes und MacDonald 2001]
 Rhodes, N.; MacDonald, M.: Technical Report – Part 3 Fire Safe Design, Thematic Network FIT ‘Fire in Tunnels’ is supported by the European Community under the fifth Framework Programme ‘Competitive and Sustainable Growth’ Contract n° G1RT-CT-2001-05017, Copyright © WTCB, Brussels, Belgium, 2001
- [Richtlinie EG 2004]
 Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz
- [Richtlinie Eisenbahntunnel 2008]
 Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln... http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_01012002_21retr.htm von 18.07.2008
- [Rudzok und Dorau 2005]
 Rudzok, M; Dorau, G.: Brandversuche im Runehamar-Tunnel November/Dezember 2005, Schmitz Gimaex, Wilnsdorf, Essener Straße 8, 57234 Wilnsdorf
- [Schenk 1987] Schenk R. :Numerische Quelltermbestimmung für schwere Gase und Dämpfe, www.dag-schenk.biz/documents/quell_2b.pdf
- [Schneeganß 2008]
 Schneeganß, M.M.: Untersuchung von Hohlstrahlrohren auf taktisch, ergonomische Handhabung und praktische Analyse der auftretenden Rückstoßkräfte bei optimierten Durchflussraten, Otto von Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Februar 2008

- [Stark et al. 1997] Stark, N.; White, R.; Clemons, C.: Heat Release Rate of Wood-Plastic Composites, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin, SAMPE Journal, Vol. 33, No. 5, September/October 1997
- [Statistisches Bundesamt 2008] Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 1.1, Verkehr, Verkehr aktuell, 03/2008, Erschienen am 27.03.2008, Artikelnummer: 2080110081034, Wiesbaden 2008
- [Statistisches Bundesamt 2007] Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 7, Verkehr, Verkehrsunfälle, 11/2007, Erschienen am 19.03.2008, Artikelnummer: 2080700071114, Wiesbaden 2008
- [Staufachstelle 2005] Bericht der Staufachstelle Baselland, Polizei Basel, Hauptabteilung Verkehrssicherheit Staufachstelle, Lausen 2005
- [Steinhaus et al. 2007] Steinhaus, T. Welch, S. Carvel, R. Torero, J.L.: Large-Scale pool fires, Thermal Science Journal (in press, expected Vol 11 issue 3, (special on fire), 2007.
- [Stroeks 2001] Stroeks, R.: Sprinklers in Japanese Road Tunnels, Head Office Technical Department Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd. Tokyo, Japan, Prepared for: Bouwdienst Rijkswaterstaat (RWS), Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Ministry of Transport, The Netherlands, Project Report BFA-10012, 2001
- [Thompson 2008] Thompson, K.: Inferno on the Interstate: What Went Wrong, Published in the April 2008 Issue, Popular Mechanics, http://www.popularmechanics.com/science/worst_case_scenarios/4252975.html?page=2
- [Thornton 1917] Thornton, W.M.: The relation of oxygen to the head of combustion of organic Compounds, the London, Edinburgh and Dublin philosophical magazine and journal of science 33, London 1917
- [TLUG 2006] Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie: Beurteilungswerte und Bewertungskriterien, <http://www.tlug-jena.de/umweltdaten/umweltdaten2006/chemie/pdf/beurteilungswerte.pdf>
- [Trottet et al 2001] Trottet, Y.; Vernez, D.; Jufer M.: Analyse de risques lors d'accidents en tunnels, Analyse de risques lors d'accidents en tunnels, www.nfp41.ch/download/modulf/kf-f2.pdf
- [TSC 2003] Guide to Road Tunnel Safety Dokumentation, Booklet 3, Risk Analyses relating to dangerous goods transport, December 2005, Tunnel Study Center, Road Directorate, France 2003
- [U.S. Navy 1997] U.S. Navy: Fire Suppression Substitutes and Alternatives to Halon for U.S. Navy Applications, Committee on Assessment of Fire Suppression Substitutes and Alternatives to Halon, Naval Studies Board, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C., 1997

- [Vaari 1999] Vaari, J.: Guidelines to large-scale Fire Testing of Water Mist Systems, TR 433 Approved 1999-10, Published by Nordtest, Tekniikantie 12, E-mail: nordtest@nordtest.org Internet: www.nordtest.org, FIN-02150 Espoo, Finland
- [VDI 1977] VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmübergang, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, 1977, ISBN 3-18-400373-6
- [Willson 2005] Willson, M.: Lastfire Foam Test, Angus Fire, AUTCFire and Security Company, in: International Fire Protection. 2005, www.ifpmag.com
- [Waninger und Harth 2004] Waninger, K. J.; Harth, C.: Aktuelle Brandschutzkonzepte für enge Räume mit erhöhtem Brandgefahren am Beispiel von Tunnelbauwerken, Fachhochschule Mainz, University of Applied Sciences, Institut für Baubetrieb e.V., Mainz, Juli 2004
- [Wietfeldt 2002] Wietfeldt, P.: Zur Bedeutung der Begriffe "Gefahr", "Risiko" und "Vorsorge" im Störfallrecht, Technische Überwachung : Anlagensicherheit - Arbeits- und Gesundheitsschutz - Umweltschutz. - 43 (2002), H. 4 , S. 39-46
- [Yuan und Lazzara 1996] Yuan, L.; Lazzara, C. P.: Effects of Ventilation and Preburn Time on Water Mist Extinguishing of Diesel Fuel Pool Fires, Pittsburgh Research Laboratory, National Institute for Occupational Safety and Health P.O. Box 18070, Cochrans Mill Road Pittsburgh, PA 15236, USA Survivability, Naval Sea System Command, Washington 1996