

Wirksamkeit auto- matischer Brand- bekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 135

bast

Wirksamkeit auto- matischer Brand- bekämpfungsanlagen in Straßentunneln

von

Bernhard Kohl
Harald Kammerer

ILF Beratende Ingenieure ZT Gesellschaft mbH
Linz

Roland Leucker
Frank Leismann

Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen (STUVA)
Köln

Andreas Mühlberger
Philipp Gast

Universität Regensburg (UR)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 135

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE: 15.0563/2012/ERB
Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Fachbetreuung:
Christof Sistenich

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 9043-9293
ISBN 978-3-95606-291-9

Bergisch Gladbach, Februar 2017

Kurzfassung – Abstract

Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Im Gegensatz zu Gebäude und Industrieanlagen wurde der Einsatz automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln bislang eher kritisch gesehen. Eine umfangreiche Validierung ihrer Wirksamkeit in Großbrandversuchen, die Optimierung der Systeme für den Tunnelleinsatz, sowie positive praktische Erfahrungen lassen ein Überdenken dieser Position angezeigt erscheinen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde sowohl die Wirksamkeit von autom. Brandbekämpfungsanlagen in Abhängigkeit von den verschiedenen Systemtypen, als auch deren Einbindung in das Gesamtsicherheitssystem eines Straßentunnels bewertet. Dabei wurden folgende Ergebnisse erarbeitet:

- Ein früherer Aktivierungszeitpunkt hat wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit einer automatischen Brandbekämpfungsanlage.
- Korrekt geplante Brandbekämpfungsanlagen können Brandentwicklung und Temperaturen bei einem Brand in einem Tunnel sehr wirkungsvoll eindämmen.
- Für den Personenschutz ist neben der Temperaturentwicklung die Rauchgasausbreitung wesentlich. Diesbezüglich gehen von einer autom. Brandbekämpfungsanlage positive wie negative Wirkungen aus. Bei Modelltunnel mit mechanischer Lüftung konnte in Simulationen eine hohe Wirksamkeit von Brandbekämpfungsanlagen dargestellt werden.
- Bei Modelltunneln mit Rauchabsaugung kann bei Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage die Wirksamkeit der Lüftung durch den eingebrachten Impuls beeinträchtigt werden.

Neben technischen Gesichtspunkten wurden auch die möglichen Einflüsse auf das menschliche Verhalten von Tunnelnutzern im Rahmen von Probandenversuchen mit virtueller Realität evaluiert. Dabei zeigte sich, dass bei gegebener Versuchsanordnung das Verhalten der Probanden (Ausstiegsverhalten, Flucht zum nächsten Notausgang) durch Aktivierung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage nicht maßgeblich verändert wird. Die Ergebnisse gelten unter der Einschränkung, dass die

haptischen Wirkungen einer autom. Brandbekämpfungsanlage, wie Kälte oder Nässe nicht modelliert werden konnten.

Effectiveness of automatic fixed fire fighting systems in road tunnels

In contrast to buildings and industrial plants the use of Fixed Fire Fighting Systems (FFFS) in road tunnels was evaluated rather critical for a long time. However, an extensive validation of their effectiveness in large-scale fire tests, the optimization of FFFS for tunnels and positive practical experiences led to a rethinking of this position.

In the framework of this research project both the effectiveness of these systems taking into account different types of systems as well as their integration into the overall safety system of a road tunnel was evaluated.

The following conclusions can be derived:

- Early activation of FFFS has a significant influence on their effectiveness.
- Proper designed FFFS can effectively influence the fire development and reduce temperatures in a tunnel.
- For personal safety, in addition to the temperature development, the flue gas propagation is essential. In this regard, a FFFS leads to positive as well as negative effects.
- For model tunnels with mechanical longitudinal ventilation systems simulations showed a high efficiency of FFFS. For model tunnels with smoke extraction systems the activation of a FFFS can negatively affect the effectiveness of the ventilation system due to the introduced vertical impulse.

In addition to technical aspects, also possible influences on human behavior of road users were evaluated. It was found that for a given experimental setup, the evacuation behavior of the subjects is not significantly changed by the activation of a FFFS. The results are valid under the restriction that the haptic effects of FFFS, such as cold or wet conditions, could not be modeled.

Inhalt

Abkürzungen	7	3.2.1 Personenschutz	24
1 Einleitung	9	3.2.2 Bauwerksschutz	24
1.1 Stand der Forschung	9	3.2.3 Eindämmung der Brandentwicklung (am betroffenen Fahrzeug)	24
1.2 Zielsetzungen	9	3.2.4 Verhinderung der Brandausbreitung (auf weitere Fahrzeuge)	24
1.3 Aufbau der Arbeit	9	3.2.5 Erleichterung eines Feuerweh- einsatzes	25
2 Grundlagen	10	3.2.6 Sicherstellung geeigneter (akzeptabler) und stabiler Fluchtbedingungen	25
2.1 Physikalische Grundlagen	10	3.2.7 Aufrechterhaltung der erforder- lichen Betriebsbedingungen anderer Sicherheitssysteme	25
2.1.1 Verbrennungsmechanismus	10	3.3 Klassifizierung automatischer BBA	25
2.1.2 Brandklassen	11	3.4 Typen und Elemente automatischer BBA	26
2.1.3 Löschmittel	11	3.4.1 Typen automatischer BBA	26
2.2 Wahrnehmungs- und emotions- psychologische Grundlagen	13	3.4.2 Elemente automatischer BBA	27
2.2.1 Visuelle Wahrnehmung	13	3.5 Wirkungsweise automatischer BBA	30
2.2.2 Auditive Wahrnehmung	14	3.5.1 Sprühflut- und Wasserdampf- anlagen	30
2.2.3 Aufmerksamkeit	15	3.5.2 Druckluftschäumenanlagen	33
2.2.4 Stress	15	3.6 Verbreitung und Anwendung von BBA	34
2.2.5 Angst	16	4 Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitssystemen	34
2.2.6 Menschliches Verhalten bei Ereignisfällen im Tunnel	16	4.1 Analyse der Wechselwirkungen – Vorgehen	34
2.2.7 Modelle zum Fluchtverhalten	16	4.2 Beschreibung der Effekte	35
2.3 Regelwerke und Leitlinien für BBA in Straßentunneln	17	4.2.1 Ebene Verkehrsteilnehmer	35
2.4 Praktische Erfahrungen	18	4.2.2 Ebene Betreiber/Operator	36
2.4.1 Durchgeführte Großbrandversuche ...	18	4.2.3 Ebene Tunnelbauwerk – Tunnelausrüstung	36
2.4.2 Reale Brandereignisse in Straßentunneln	19	4.2.4 Ebene Rettungsorganisationen	37
2.4.3 Expertenbefragungen	20		
2.4.4 Einsatz von BBA in Straßentunneln bei realen Bränden	20		
3 Automatische Brand- bekämpfungsanlagen	23		
3.1 Definition nach PIARC	23		
3.2 Schutzziele für den Einsatz automatischer BBA	23		

5	Betrieb von automatischen BBA	...	37	7.2	Ergebnisse	...	53
5.1	Aktivierung einer BBA aus dem Blickwinkel der Brandbekämpfung	...	37	7.2.1	Fragebogenbefragung	...	53
5.2	Aktivierung aus dem Blickwinkel der Wechselwirkungen	...	39	7.2.2	Fragebogen zur BBA	...	54
5.3	Prozedere zur Aktivierung einer BBA	...	40	7.2.3	Verhaltensdaten	...	56
5.4	Aktivierungsabschnitte	...	40	7.2.4	Fluchtverhalten außerhalb der BBA (Zusatzgruppe)	...	57
5.5	Wiederinbetriebnahme einer BBA nach Aktivierung	...	41	7.3	Diskussion	...	58
6	Modellierte Tunneltypen	...	41	7.3.1	Fragebogendaten	...	58
6.1	Festlegung der Basiskonfiguration der modellierten Tunneltypen	...	41	7.3.2	Wahrnehmung von Sicherheitselementen	...	58
6.2	Variationen von maßgebenden Tunnelparametern	...	42	7.3.3	Fragebogenbefragung zur BBA	...	59
6.2.1	Gegenverkehrstunnel	...	42	7.3.4	Verhaltensdaten	...	59
6.2.2	Richtungsverkehrstunnel	...	42	7.3.5	Stärken und Grenzen der Studie	...	60
6.3	Konfiguration der BBA	...	43	7.3.6	Empfehlungen	...	61
6.3.1	Allgemeine Annahmen für die Anlagenkonfiguration	...	43	8	Beurteilung der Wirksamkeit von BBA	...	62
6.3.2	Konfiguration der einzelnen BBA-Typen	...	44	8.1	Risikoanalytisches Modell	...	62
7	Beurteilung der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelbenutzer	...	46	8.1.1	Einleitung	...	62
7.1	Methodik	...	46	8.1.2	Modellgrundlage	...	62
7.1.1	Probanden	...	47	8.1.3	Annahmen und Parameter für die Risikoberechnungen	...	62
7.1.2	Simulationsgerät	...	47	8.1.4	Modellierung der Wirkung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage	...	65
7.1.3	Übung	...	48	8.2	Ergebnisse der Bewertung der Wirksamkeit von BBA auf Basis des Risikomodells	...	68
7.1.4	Fahrscenario	...	49	8.2.1	Relevanz des Brandrisikos im Vergleich zum Gesamtrisiko	...	68
7.1.5	Fluchtszenario	...	50	8.2.2	Gegenverkehrstunnel	...	69
7.1.6	Unabhängige Variable	...	51	8.2.3	Richtungsverkehrstunnel	...	72
7.1.7	Fluchtverhalten außerhalb der BBA (Zusatzgruppe)	...	51	8.3	Sensitivitätsanalyse	...	75
7.1.8	Abhängige Variable	...	52	8.3.1	Einfluss Risikomodell	...	75
7.1.9	Schlussfolgerungen Methodik	...	53	8.3.2	Einfluss einer Abdeckung der Brandlast auf die Wirksamkeit einer BBA	...	76

8.3.3 Einfluss des Aktivierungszeitpunktes auf die Wirksamkeit einer BBA	77
8.4 Wirksamkeit von BBA in Hinblick auf das Schutzziel Bauwerkschutz	79
8.5 Stärken und Grenzen der Untersuchungen	80
9 Schlussfolgerungen und Ausblick	81
10 Literatur	85

Anhang

Der Anhang kann in der Bibliothek der BAST eingesehen werden.

Abkürzungen

A3F	Aqueous Film Forming Foam
ADR	Europäisches Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route
BBA	Brandbekämpfungsanlage
CFD	Computational Fluid Dynamics
DLS	Druckluftschäum
DN	Nenndurchmesser
FDS	Fire Dynamics Simulator
FFFP	Filmbildendes Fluor-Protein
FFFS	Fixed Fire Fighting Systems
HRR	Heat release rate (Wärmefreisetzungsrate)
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
NFPA	National Fire Protection Association
PIARC	Permanent International Association of Road Congresses
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SF	Sprühflut
VZ	Verschäumungszahl
ZR	Zumischrate

1 Einleitung

1.1 Stand der Forschung

Automatische Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Straßentunneln finden derzeit nur außerhalb Europas, speziell in Australien und Japan, breite Anwendung. Dort existieren bereits seit geraumer Zeit nationale Vorschriften, welche die Installation von BBA grundsätzlich fordern. Ungeachtet der indifferenten Vorschriftenlage besteht weltweit erkennbar eine Tendenz, bei besonderen Anforderungen sowohl für neue als auch für bestehende Tunnel zunehmend BBA als mögliches Ausstattungsmerkmal mit in die Untersuchungen einzubeziehen. Regelwerke geben diesbezüglich jedoch bis dato keine Hinweise, wie mit der Thematik BBA in Straßentunneln speziell im Hinblick auf mögliche Kompensationsmöglichkeiten umzugehen ist. Aus deutscher Sicht bestand daher die Notwendigkeit einer unabhängigen Untersuchung, um die zukünftige Bedeutung dieser Anlagen bei der Ausstattung von Tunneln im Bereich der Bundesfernstraßen einschätzen zu können.

In der jüngeren Vergangenheit fand jedoch eine dynamische Entwicklung sowohl im Hinblick auf die Entwicklung und Optimierung der Systeme für den Tunneleinsatz als auch im Hinblick auf die Validierung ihrer Wirksamkeit im Rahmen von Großbrandversuchen statt. Diese Entwicklung wurde begleitet von intensiver Forschungstätigkeit (z. B. auf europäischer Ebene durch UPTUN 2006 [68] und SOLIT/SOLIT2 im Jahr 2006/2012 [62, 63] in Deutschland) sodass heute die generelle Wirksamkeit dieser Systeme im Sinne einer effizienten Brandunterdrückung (nicht Löschung) als nachgewiesen gilt und international anerkannt ist. Infolge wurden in jüngerer Vergangenheit auch in Europa – meist bei spezifischen Rahmenbedingungen – mehrere Tunnel mit automatischen Brandbekämpfungsanlagen ausgerüstet (meist mit Hochdruckwassernebelanlagen), so z. B. der Felbertauerntunnel (Österreich), der West Tunnel der A 86 in Paris (Frankreich) oder Bereiche der M30 in Madrid (Spanien).

Weniger klar als die Wirksamkeit der Anlagen selbst sind derzeit (Stand Frühjahr 2014) allerdings noch verschiedene Fragestellungen der praktischen Anwendung und insbesondere die Einbindung derartiger Anlagen in die hochentwickelten und komplexen Sicherheitssysteme europäischer Straßentunnel. In diesem Zusammenhang stellen

sich insbesondere Fragen der Wechselwirkung mit anderen technischen Systemen einerseits und mit dem menschlichen Verhalten andererseits sowie der Möglichkeit von Kompensation bei konventionellen Sicherheitssystemen.

1.2 Zielsetzungen

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung von abgesicherten Aussagen zur Wirksamkeit von automatischen Brandbekämpfungsanlagen beim Einsatz in Straßentunneln auf Basis des aktuellen Standes der Forschung und der Technik. Als Wirksamkeit einer BBA wird die Fähigkeit der Anlage definiert, eine Reduzierung der Brandleistung und Brandausdehnung und dadurch eine maßgebliche Minderung der negativen Brandfolgen hervorzurufen. Dabei sollen sowohl die Wirksamkeit der Anlagen in Abhängigkeit von den verschiedenen Systemtypen als auch deren Einbindung in das Gesamtsicherheitssystem eines Straßentunnels bewertet werden. Neben technischen Gesichtspunkten sollen auch die möglichen Einflüsse auf das menschliche Verhalten (z. B. im Zuge der Selbstrettung) berücksichtigt werden.

Damit sollen einerseits abgesicherte Entscheidungsgrundlagen aufgestellt werden, die seitens des Baulastträgers in der Diskussion über den Einsatz derartiger Anlagen herangezogen werden können, als auch die sicherheitstechnischen Bewertungsgrundlagen für eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit derartiger Anlagen geschaffen werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Ausgangsbasis der vorliegenden Untersuchung bilden bestehende nationale und internationale Entwicklungen und Tendenzen im Bereich von Brandbekämpfungsanlagen. Eine ebenso wichtige Grundlage für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens sind Ergebnisse und Erkenntnisse aus bisher durchgeführten Brandversuchen und praktische Erfahrungen von Betreibern und Herstellern von in Betrieb befindlichen Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln.

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Praxis wird anschließend die Wechselwirkung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage mit anderen bautechnischen oder ausrüstungstechnischen

Sicherheitsmaßnahmen untersucht. Ziel ist dabei, zu analysieren, hinsichtlich welcher Wirkungen Überschneidungen der Brandbekämpfungssysteme mit anderen Maßnahmen bestehen, sowie ob und inwieweit gegebenenfalls Kompensationen von anderen Sicherheitssystemen möglich sind bzw. ob unerwünschte Effekte auftreten können.

Psychologische Untersuchungen des menschlichen Verhaltens und Probandenversuche in virtueller Realität beantworten zuvor offene Fragen über das Verhalten des Nutzers bei einer aktivierten Anlage. Aus diesen Untersuchungen werden Erkenntnisse abgeleitet, ob und wie eine Brandbekämpfungsanlage die Selbstrettungsphase beeinflusst.

Zur Abbildung der physikalischen Wirkungszusammenhänge wird unter Einbeziehung der Ergebnisse und Messdaten von Großbrandversuchen ein CFD-Modell entwickelt, das die Wirkungen einer automatischen Brandbekämpfungsanlage auf definierte Modellbrandszenarien realitätsnah abbilden kann. Dieses Teilmodell wird in ein geeignetes, bereits bestehendes risikoanalytisches Modell zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln integriert. Ziel des Forschungsvorhabens ist die risikobasierte Wirkungsbeurteilung von automatischen Brandbekämpfungsanlagen anhand eines quantitativen Risikomodells zu untersuchen.

2 Grundlagen

Im Zuge der Ausarbeitung des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Grundlagenstudien durchgeführt. Das Kapitel Grundlagen beschränkt sich auf eine kompakte Darstellung der Grundlagen, um die Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit der nachfolgenden Kapitel zu gewährleisten. Die Gliederung der Grundlagen ist in Bild 1 dargestellt.

Um die Unterschiede der in der Praxis zum Einsatz kommenden Brandbekämpfungsanlagen verglei-

chen zu können, werden zunächst die allgemeinen physikalischen und technischen Grundlagen von Verbrennungsvorgängen sowie die daraus abgeleiteten Löschrategien erläutert. Anschließend werden wahrnehmungs- und emotionspsychologischen Grundlagen erläutert, welche die Basis der Probandenversuche bilden. Danach werden die derzeit für den Einsatz von BBA in Straßentunneln gültigen Leitlinien und Regelwerke vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über die in der Vergangenheit durchgeführten Brandversuche gegeben und es werden die wesentlichen daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Erfahrungen aus der Praxis runden das Bild ab: dabei werden sowohl die wenigen realen Brandereignisse mit Einsatz einer BBA diskutiert als auch die Inhalte der durchgeführten Expertenbefragungen vorgestellt.

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Verbrennungsmechanismus

Ein Verbrennungsvorgang ist eine chemische Reaktion, bei der sich brennbare Stoffe unter Energieumsatz mit Sauerstoff zu Verbrennungsprodukten verbinden. Damit ein Verbrennungsvorgang ablaufen kann, müssen sowohl stoffliche Voraussetzungen, als auch energetische Voraussetzungen erfüllt sein [57].

Als stoffliche Voraussetzungen müssen folgende drei Bedingungen erfüllt sein:

- Brennbare Stoff
 - Die Verbrennung kann nur ablaufen, wenn genügend brennbare Stoff in einer für die Verbrennung geeigneten Form vorhanden ist.
- Sauerstoff
 - Sauerstoff muss als Oxidationsmittel der Verbrennung in ausreichender Menge vorhanden sein.



Bild 1: Grundlagenblöcke

- Mengenverhältnis

Brennbarer Stoff und Sauerstoff können nur miteinander reagieren, wenn sie in Kontakt stehen und in einem günstigen Mengenverhältnis vorliegen. Die Grenzen des Konzentrationsintervalls, welche eine Verbrennung ermöglichen sind vom brennbaren Stoff abhängig. Zum anderen müssen über die stofflichen Voraussetzungen hinaus, gleichzeitig bestimmte energetische Voraussetzungen erfüllt sein, damit ein Verbrennungsvorgang ablaufen kann. Diese betreffen das Einleiten der Verbrennung (Entzünden) und die Unterhaltung einer eingeleiteten Verbrennung.

- Zündtemperatur und Mindestverbrennungstemperatur

In der Regel sind Reaktionen zwischen brennbaren Stoffen und Sauerstoff gehemmt, d. h. es bedarf eines mehr oder weniger starken energetischen Anstoßes in Form von zugeführter Zündenergie. Ist die Verbrennung eingeleitet, so ist eine Mindestenergie notwendig, damit die Verbrennungsreaktion selbstständig als Reaktionskette weiterläuft. Die Mindestverbrennungstemperatur gibt die niedrigste Temperatur des reagierenden Brennstoff/Sauerstoffgemisches an, bei dem der Brennvorgang gerade noch möglich ist.

- Katalysator

Normale Verbrennungsreaktion laufen unter Anwesenheit von Katalysatoren ab. Diese Katalysatoren wirken in erster Linie als Radikalkettenstarter. Katalysatoren sind Stoffe, die mit mindestens einem der Ausgangsstoffe reaktionsfähigere Zwischenverbindungen bilden, welche dann mit den anderen Stoffen so weiter reagieren, dass die Katalysatoren im Verlauf der Gesamtreaktion wieder zurückgebildet werden. Für Verbrennungsreaktion bedeutet dies, dass durch die Anwesenheit geeigneter Katalysatoren die Zündenergie bzw. die Zündtemperatur und die Mindestverbrennungstemperatur stark gesenkt werden. Beispielsweise wirken H^* - und OH^* -Radikale, welche unter Umgebungsbedingungen in Luft in ausreichender Mengen enthalten sind, als Katalysator bei Verbrennungsvorgängen.

Umgekehrt existieren reaktionshemmende Substanzen (Inhibitoren), welche den Verbrennungsprozess auf chemischem Weg unterbinden, beispielsweise Halone.

2.1.2 Brandklassen

Nach DIN werden brennbare Stoffe in Brandklassen eingeteilt, um Stoffen mit gleichem Brandverhalten geeignete Löschmittel zuzuordnen zu können [13].

Das bedeutet, dass ein Löschmittel, welches beispielsweise für die Brandklasse A geeignet ist, für alle Brände dieser Klasse verwendbar sein muss. Daraus ergibt sich im Umkehrschluss die Folgerung, dass Brände, die nicht mit einem für die Brandklasse A geeigneten Löschmittel löschar sind, nicht dieser Brandklasse zugeordnet werden können. Folgende Brandklassen werden unterschieden:

- Klasse A – Brände fester Stoffe,
- Klasse B – Brände von flüssigen oder flüssig werdenden Stoffen,
- Klasse C – Brände von Gasen,
- Klasse D – Brände von Metallen,
- Klasse F – Brände von Speiseölen/-fetten.

Im englischsprachigen Raum kommt vielfach die NFPA zur Anwendung. Nach NFPA werden abweichend von den Definitionen der Euronorm nur vier Brandklassen unterschieden. Brennbarer Flüssigkeiten und Gase werden nach NFPA gleichermaßen der Klasse B zugeordnet, da Flüssigkeiten in ihrer Dampfphase brennen.

2.1.3 Löschmittel

Als Löschmittel bezeichnet man Stoffe, die geeignet sind, durch bestimmte Löschwirkungen (Löscheffekte) die Verbrennung zu unterbinden.

Löschvorgänge unterbrechen den Verbrennungsvorgang, indem mindestens eine der in Kapitel 2.1.1 dargestellten stofflichen oder thermischen Voraussetzungen ausgeschaltet wird. Die grundsätzlichen Einwirkungsmechanismen eines Löschverfahrens lauten daher:

- Löschen durch Stören der mengenmäßigen Reaktionsbedingungen. In der praktischen Anwendung erfolgt eine Reduzierung des Sauerstoffgehaltes unter den für Verbrennungsvorgänge erforderlichen Minimalgehalt (ca. 15 Vol.-%), oder eine physische Trennung der brennbaren Substanzen vom Sauerstoff.

- Löschen durch Stören der thermischen Reaktionsbedingung: Abkühlen. Reduzierung der Temperatur der brennbaren Substanzen oder der Flamme.
- Löschen durch antikatalytische Wirkung: chemische Hemmung durch Zugabe von Chemikalien, die den Verbrennungsprozess unterbinden.

Die Bekämpfung von Bränden in Tunneln erfolgt in der Regel durch Löschmitteleinsatz zur Kühlung oder Abdeckung des Brandgutes. Eine Reduzierung des Sauerstoffgehaltes im Tunnel durch inerte Gase (Kohlendioxid CO₂, Stickstoff N₂) oder der Einsatz von Chemikalien mit antikatalytischer Wirkung beschränkt sich auf Sonderfälle im Gebäudereich und ist im Bereich von Brandbekämpfungsanlagen für Tunnel aufgrund der vorliegenden Randbedingungen nicht relevant.

Wasser ohne Zusatzstoffe

Wasser ist seit jeher das meist verbreitete Löschmittel, da es allgemein leicht verfügbar, preisgünstig, im Ausgangszustand ungiftig, nicht ätzend und gut förderbar ist.

Auch der Einsatz von Wasser mit Zusatzstoffen als Löschmittel (s. Kapitel 2.1.3) ist bei Feuerwehereinsätzen weltweit übliche Praxis.

Die überwiegende Löschwirkung des Wassers beruht auf dem Kühleffekt. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser verbunden mit der hohen Verdampfungswärme wird dem Brandherd Wärme entzogen. In dem für das Löschen durch Abkühlen relevanten Temperaturbereich zwischen 10 und 100 °C kann ein Liter Wasser die außerordentlich große Wärmemenge von rund 2.635 kJ binden, und zwar rund 375 kJ (entspricht 15 %) durch Erwärmen von 10 °C auf 100 °C und rund 2.260 kJ (entspricht 85 %) durch Verdampfen bei 100 °C. Unterschreitet der brennbare Stoff infolge der Kühlung die Mindestverbrennungstemperatur, kommt der Verbrennungsvorgang zum Erliegen. In welchem Maße das hohe Wärmebindungsvermögen des Wassers zur Geltung kommt, hängt maßgeblich vom Zerteilungsgrad des Wasser und der benetzten Oberfläche ab. Eine große Oberfläche bedeutet eine große Kontaktfläche für die Wärmeübertragung. Dadurch können kleinere Tröpfchen eines Sprühstrahls sich wesentlich schneller erwärmen, siedeln und verdampfen als die kompakte Masse des Vollstrahls, welche ausschließlich das Brandgut kühlt.

Als Nebenlöschwirkung von Wasser tritt ein Ersticken des Feuers durch Benetzen der brennenden Oberflächen auf, wodurch der Sauerstoffzutritt unterbunden wird.

Bei Stoffen, die gefährlich mit Wasser reagieren, ist der Einsatz von Wasser als Löschmittel unzulässig (z. B. Kaliumhydroxid, Calciumoxid). Nach ADR (Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route) sind Fahrzeugladungen mit Stoffen, welche gefährlich mit Wasser reagieren durch ein „X“ vor der den Ziffern der Gefahrunnummern gekennzeichnet.

Wasser ergänzt um Additive

Um die Löscheigenschaften des Wassers zu verbessern und die nachteiligen Effekte des Löschwassers zu minimieren werden unterschiedliche Additive eingesetzt. Die fertige Mischung wird „Netzwasser“ genannt.

Netzmittel werden zugesetzt, um durch Herabsetzen der Oberflächenspannung (Benetzungseffekt) das Eindringen des Löschmittels in das Brandgut zu verbessern. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass das Löschwasser besser in brennende Materialien wie Holz oder Stoff eindringen kann und somit einen erhöhten Kühleffekt nach sich zieht.

Als Netzmittel werden normalerweise Schaummittel in niedrigerer Dosierung und ohne Luftbeimischung verwendet. Übliche Mehrbereichsschaummittel, die zur Schaumerzeugung mit 3 % zugemischt werden, können z. B. bereits in einem Bereich von ca. 0,5 % bis 1 % als Netzmittel (d. h. ohne Schaumbildung) eingesetzt werden.

Schaum

Löschschaum besteht aus Gasblasen, die in einen Flüssigkeitsfilm eingeschlossen sind. Bei den heute von den Feuerwehren verwendeten Schäumen wird als Füllgas herkömmliche Umgebungsluft in einem Wasser-Schaummittel-Gemisch verwendet.

Die Erzeugung von Löschschaum erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt wird dem Löschwasser Schaummittel zugemischt. Optimal für eine gleich bleibende Verschäumung und damit konstante Qualität des erzeugten Schaums ist die proportionale Zumischung (Zumischrate) des Additivs in der

Dosiereinrichtung (Zumischer) unabhängig vom Durchfluss. Im zweiten Schritt erfolgt die Zuführung von Luft. Dies kann bei Austreten des Löschwassergemischs an der Düse erfolgen oder wie im Fall von Druckluftschäum in einem zwischengeschalteten Schaumgerät.

Wesentliche Kenngröße des Löschschaumes ist die Verschäumungszahl (VZ), welche angibt, um wie viel das Volumen des erzeugten Schaums bezogen auf das Volumen des Wasser-Schaummittel-Gemisches vergrößert ist. Die Verschäumung ist abhängig vom Schaummittel, vom Schaumgerät, von der Zumischrate und vom Wasserdruck. Die Zumischrate gibt den prozentualen Anteil des Schaummittels am Gesamtdurchfluss der Wasser-Schaummittelgemisch-Menge an.

In Abhängigkeit der Verschäumungszahl werden folgende Schaumarten klassifiziert:

- Schwerschaum mit VZ 4-20, niedriger Luftanteil,
- Mittelschaum mit VZ 20-200, hoher Luftanteil,
- Leichtschaum mit VZ 200-1000, sehr hoher Luftanteil = leichter, trockener Schaum.

Bei Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln auf Schaumbasis kommt Schwer- bis Mittelschaum zum Einsatz.

Schwerschaum weist bei einem hohen Gewicht ein vergleichsweise geringes Volumen auf, er ist gut fließfähig, abbrandstabil und gasdicht. In Abhängigkeit des verwendeten Schaummittels weist Schwerschaum gute benetzende Wirkung und eine hohe Haftfähigkeit auf. Die Löschwirkung von Schwerschaum beruht auf dem Kühl- und Trenneffekt; bei „A3F“- und „FFFP“-Schaummitteln zusätzlich auch Filmbildung.

Mittelschaum weist ein geringes Gewicht bei vergleichsweise großem Volumen auf. Mit steigender Verschäumungszahl variiert der entstehende Schaum von nass (bei relativ kleinen Blasen) über feucht bis „trocken“ (relativ grobe Blasenstruktur). Mittelschaum verfügt über gute Fließfähigkeit und schnelle Ausbreitung in größerer Dicke, weist jedoch eine geringe Haftfähigkeit auf. Die Löschwirkung von Mittelschaum beruht auf der Kühlwirkung des abgedeckten Brandgutes und der Trennwirkung der Reaktionspartner. Je trockener der Schaum hergestellt wird, umso weiter verschiebt sich die Hauptlöschwirkung vom Kühl- zum Trenneffekt. Der Einsatzbereiche von Mittelschaum um-

fassen Brandklasse A und Brandklasse B (hier $VZ < 100$), zu Flutungen (VZ möglichst > 100). Kein Einsatz beziehungsweise große Vorsicht (je nach Verschäumungszahl und Schaumqualität) ist aufgrund des Wassergehaltes des Schaums bei Stoffen, die gefährlich mit Wasser reagieren, angezeigt.

Sonstige Löschmittel

Neben Wasser und Schaum kommen auch noch andere Löschmittel bei der Brandbekämpfung zum Einsatz; z. B. inerte Gase (Kohlendioxid, Argon, Stickstoff oder eine Mischung dieser Gase), hemmende Gase (Halon/Bromid, dessen Einsatz seit 2004 aber aufgrund der die Ozonschicht schädigenden Wirkung untersagt ist) und Pulverlöschmittel. Diese spielen aber für automatische BBA in Tunneln keine Rolle.

2.2 Wahrnehmungs- und emotionspsychologische Grundlagen

Um das Erleben und Verhalten von Tunnelnutzern im Ereignisfall verstehen zu können, ist es notwendig, verschiedene Aspekte der menschlichen Informationsverarbeitung zu berücksichtigen. Zentrale Komponenten sind hier die Wahrnehmung [21], da über die verschiedenen Sinneskanäle die notwendigen Informationen aufgenommen werden, die zunächst ein Verständnis der aktuellen Situation als auch die Wahrnehmung der Möglichkeiten und Ziele von Verhalten beinhalten. Die zwei wichtigsten Sinneskanäle (Visuell und Auditiv) sowie die Bedeutung von Aufmerksamkeitsprozessen werden kurz dargestellt und auf ihre Relevanz für die vorliegenden Fragestellungen beleuchtet. Anschließend werden emotions- und motivationspsychologische Aspekte [58] (insbesondere Angst und Stress) sowie relevante Handlungsmodelle kurz vorgestellt, da diese für die Initiierung von Verhalten von besonderer Bedeutung sind. Auch hier erfolgt eine Beschränkung auf besonders relevante Aspekte sowie eine Fokussierung auf die für die Fragestellung relevanten Aspekte.

2.2.1 Visuelle Wahrnehmung

Das Auge ist das wichtigste Sinnesorgan des Menschen, da die meisten Sinneneindrücke über das visuelle System vermittelt werden. Dabei ist die Qualität der Information sehr von physikalischen

Aspekten der Umwelt (z. B. Helligkeit, Verrauchung) und der visuellen Information (z. B. Reflexion; Hinterleuchtung) abhängig. Auch sicherheitsrelevante Aspekte des Tunnels (Notausgänge, Fluchtwegkennzeichnungen) werden visuell dargeboten. Dabei spielt auch die Farbe der Sicherheitseinrichtung eine wichtige Rolle. So ist es zum Beispiel sinnvoller Notausgänge „grün“ statt „rot“ zu beleuchten, da die Farbe „Rot“ einen Warncharakter besitzt und eher Vermeidungsverhalten hervorruft [15]. Allerdings ist zu beachten, dass die Farbwahrnehmung in dunklen Umgebungen reduziert ist. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, farbige Sicherheitseinrichtungen ausreichend zu be- oder hinterleuchten, um die Wirkung der Farbe zu erzielen. Parameter der visuellen Wahrnehmung müssen also beachtet werden, sowohl um menschliches Verhalten verstehen und nachvollziehen zu können als auch um wirksame Schutzmaßnahmen entwickeln zu können.

Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es noch keine kontrollierten Untersuchungen zum Einfluss von Brandbekämpfungsanlagen auf das Verhalten von Tunnelnutzern. Studien zeigen aber, dass bei erschwerten Sichtbedingungen (Verrauchung) die Tunnelwand ein wichtiger Orientierungspunkt ist, an dem sich Personen entlang bewegen [20]. Andere Studien zeigen, dass es Personen vermeiden verrauchte Bereiche zu betreten, auch wenn diese auf ihrem Fluchtweg liegen. Außerdem verringert sich die Bewegungsgeschwindigkeit in verrauchten Bereichen aufgrund der erschwerten Sichtbedingungen deutlich [54]. BOER (2002) führte eine Reihe von Untersuchungen mit Personen in Straßentunneln durch. Aus diesen schlussfolgerte er, dass die sicherheitsrelevanten Elemente in einem Tunnel eindeutig aufzeigen müssen wie im Ereignisfall die Evakuierung durchzuführen ist [3].

Aus den vorliegenden Befunden lassen sich folgende Überlegungen für die Effekte einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage ableiten: Wegen der verminderten Sicht im Einflussbereich der Brandbekämpfungsanlage könnte eine Orientierung an den Wänden des Tunnels erfolgen, die Fluchtgeschwindigkeit könnte reduziert sein und die Orientierung und Entscheidungsfindung bei der Evakuierung beeinträchtigt. Brandbekämpfungsanlagen könnten die Informationsfindung von Tunnelnutzern beeinträchtigen, da die sicherheitsrelevanten Aspekte des Tunnels, wie zum Beispiel Beschilderungen, schlechter wahrgenommen oder gar nicht gesehen werden.

2.2.2 Auditive Wahrnehmung

Neben der visuellen Wahrnehmung beeinflusst als zweiter sehr wichtiger Sinneskanal die auditive Wahrnehmung menschliches Verhalten. Bezogen auf Gefahrensituationen im Tunnel sind oft erste Hinweise auf einen Unfall der Lärm eines Aufpralls, die Warntöne einer Alarmanlage oder Durchsagen der Tunnelleitstelle. Tunnelnutzer orientieren sich in einer Gefahrensituation meist an den Stimmen des Rettungspersonals oder der Polizei. So fanden beispielsweise SUIGMAN und Kollegen (1988) heraus, dass es bei der Evakuierung einer größeren Gruppe aus einer Gefahrensituation von Vorteil ist, Anweisungen in einer klaren, lauten Stimme zu geben [66]. Zur technischen Ausgestaltung von Lautsprecheranlagen in Straßentunnel, um die Verständlichkeit von Durchsagen zu gewährleisten, liegt eine eigene Untersuchung im Auftrag der BAST vor [6]. Bezüglich des Alarmsignals, das auf einen Brand hinweist, nennt CANTER (1990) einige wichtige Kriterien [8]:

Die Bedeutung eines Feueralarms muss klar sein und sich von anderen Alarmarten unterscheiden.

1. Feueralarme müssen valide und zuverlässige Indikatoren für ein Feuer sein.
2. Menschen müssen über die Lokation des Brandes Bescheid wissen, damit sie den Alarm authentifizieren können und Handlungen planen können.
3. Es müssen Informationen über adäquate Verhaltensweisen als Antwort auf den Alarm bereitgestellt werden. Vor allem auch Informationen über mögliche Fluchtwege.

Aus den vorliegenden Befunden lassen sich folgende Überlegungen für die Effekte einer aktivierten Wassernebelanlage ableiten: Eine Brandbekämpfungsanlage stellt eine zusätzliche Geräuschquelle im Tunnel dar, die die Kommunikation zwischen Tunnelnutzern, aber auch zwischen Tunnelnutzern und Betriebspersonal und Rettungskräften beeinträchtigen könnte. Besondere Auswirkungen könnte sie auf die Planung von auditiven Leitsystemen im Tunnel haben. Denn gerade Lautsprecherdurchsagen könnten durch die aktivierte Brandbekämpfungsanlage in ihrer Hörbarkeit oder ihrer Verständlichkeit beeinträchtigt werden.

2.2.3 Aufmerksamkeit

Die Wahrnehmung von Umgebungsreizen ist stark von Aufmerksamkeitsprozessen abhängig. Aufmerksamkeit kann entweder willentlich von einer Person auf einen bestimmten Reiz gelenkt werden (Top-Down) oder ein Reiz kann, aufgrund seiner Eigenschaften, die Aufmerksamkeit einer Person auf sich ziehen (Bottom-Up).

Eine Metapher zur Beschreibung von selektiver Aufmerksamkeit ist die Spotlight-Metapher. Die Aufmerksamkeit stellt dabei einen Lichtkegel dar, der bestimmte Objekte oder Informationen anstrahlen kann [44, 52]. Auf diesen liegt dann unsere Aufmerksamkeit. Dies hat aber auch gleichzeitig zur Folge, dass alle anderen Objekte und Informationen, die gleichzeitig dargeboten werden, „im Dunkeln liegen“ und höchstens peripher wahrgenommen werden. Nach POSNER kann dieser Lichtkegel der Aufmerksamkeit nicht geteilt werden. Wir können unsere Aufmerksamkeit, zumindest unsere visuelle Aufmerksamkeit, immer nur auf eine Stelle unseres visuellen Feldes konzentrieren. Dabei muss die Aufmerksamkeit nicht immer auf dem Objekt liegen, auf welchen die Augen in diesem Moment fixiert sind [52].

GROEGER (2001) fasst als Ergebnis mehrerer Studien zusammen, dass in Gefahrensituationen die Aufmerksamkeit auf bedrohungsrelevante Reize gelenkt wird und dass die Aufmerksamkeit auf einen Reiz gerichtet bleibt, bis eine kognitive Analyse des Reizes abgeschlossen ist oder keine neuen Informationen mehr gewonnen werden können. Danach kann die Aufmerksamkeit den neuen Reiz ausgerichtet werden, der dann die höchste Salienz besitzt [22].

Aus den Befunden zur Aufmerksamkeit stellt sich in Bezug auf Brandbekämpfungsanlagen die Frage, ob die Brandbekämpfungsanlage als bedrohungsrelevanter Reiz angesehen werden kann oder angesehen werden muss. Damit könnte sie die Aufmerksamkeit von wichtigen sicherheitsrelevanten Objekten abziehen und die Phase der Informationsfindung verlängern.

Eng mit der Aufmerksamkeit hängt die Orientierungsreaktion zusammen. Dabei handelt sich um eine reflexartige Ausrichtung der Sinne auf plötzliche Änderungen der aktuellen Situation [61]. Diese Reaktion kann auch gegen die Intention der Person stattfinden. Durch die Orientierungsreaktion kann gerade ausgeführtes Verhalten unterbrochen werden.

Aus den Befunden zur Orientierungsreaktion lassen sich folgende Überlegungen für die Effekte einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage ableiten: Die Brandbekämpfungsanlage als neuer und unbekannter Reiz könnte eine Orientierungsreaktion auslösen, die den Tunnelnutzer in seinen Handlungen unterbricht und dadurch die Evakuierungszeit verlängert.

2.2.4 Stress

Im Folgenden soll auf die Entstehung von Stress in Notfällen und den Umgang mit Stress eingegangen werden. Weiterhin soll die Emotion Angst näher beleuchtet werden. Diese Emotion ist im Kontext von Ereignissen im Tunnel von besonderem Interesse, da sie die im Ereignisfall die vorherrschende Emotion ist, die gravierenden Einfluss auf die Physiologie, die Psyche und das Verhalten des Menschen hat.

Allgemein kann Stress als ein Reaktionsmuster des Körpers beschrieben werden, das auf Stimuli oder Situationen erfolgt, die dessen Fähigkeiten die Situation zu bewältigen stark beanspruchen oder übersteigen. Eine solche Situation stellt zum Beispiel eine Gefahrensituation im Tunnel dar.

PROULX (1993) beschreibt in seinem Stressmodell die Entstehung von Stress bei Menschen, die sich mit einem Feuer konfrontiert sehen. Darin konstatiert er, dass psychischer Stress keineswegs immer dysfunktional sein muss. Im Gegenteil ist ein gewisses Ausmaß an Stress oft nötig um eine angemessene Reaktion auszulösen. Zu viel Stress kann jedoch lähmend wirken.

Das Modell erklärt die Entstehung von Stress und Handlungsintentionen mit mehreren rekursiven Schleifen, in denen mehrdeutigen Informationen verarbeitet werden. Diese wiederholte Verarbeitung führt zu steigendem Stress und Handlungsbereitschaft. Der erhöhte Stress und die verstärkte Angst erschwert wiederum eine schnelle Entscheidung, da sie kognitive Kapazitäten beanspruchen. Das Modell geht davon aus, dass die Chance eine angemessene Entscheidung zu treffen immer kleiner wird, umso größer der Stress einer Person wird [53].

Aus den Befunden zur Stressentstehung lassen sich folgende Überlegungen zum Einfluss von Brandbekämpfungsanlagen ableiten: Die Brandbekämpfungsanlage als zusätzlicher Reiz im Tunnel könnte den Stress erhöhen, weil wegen der einge-

schränkten Sicht und der akustische Belastung zusätzliche mehrdeutige Informationen verarbeitet werden müssen. Dieser zusätzliche Stress könnte nach dem Modell von PROULX (1993) lähmend wirken und dadurch die Selbstrettung verlangsamen oder verhindern.

2.2.5 Angst

In Bezug auf den Menschen wird Angst meist als ungerichtete, diffuse, peripher-physiologische, zentralnervöse und subjektive Überaktivierung bei der Wahrnehmung von Gefahren definiert [1].

Angst ist außerdem dadurch gekennzeichnet, dass kognitive Ressourcen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis) automatisch auf den bedrohlichen Stimulus gerichtet werden, dass automatisch der Impuls zur Vermeidung dieses Stimulus ausgelöst wird und die physiologische Erregung ansteigt. Diese Angst kann sich auch in Panik verwandeln, wenn das Leben des Menschen direkt bedroht wird. Flucht ist dann die dominierende Reaktion.

Rund 30 % der Tunnelnutzer fühlen sich im Tunnel unwohl, zeigen aber größtenteils keine somatischen Angstäquivalente oder Vermeidungsverhalten. Nur wenn die Angst übermäßig, überdauernd, nicht zu bewältigen ist und zu Einschränkungen im Leben führt, dann wird nach ICD-10 eine spezifische Phobie vom situativen Typus „Tunnelphobie“ diagnostiziert [71]. Zur validen und reliablen Erfassung der Tunnelangst wurden der Tunnelangstfragebogen sowie der General Fear of Tunnels Questionnaire entwickelt [39].

Angst beansprucht kognitive Ressourcen, die somit für weitere Aufgaben nicht mehr verfügbar sind [40]. In Übereinstimmung mit dieser Überlegung konnte anhand von Tunnelfahrten in virtueller Welt gezeigt werden, dass tunnelängstliche Personen Sicherheitssignale schlechter wahrnehmen [17].

Aus den Befunden zur Angst lassen sich folgende Überlegungen zum Einfluss von Brandbekämpfungsanlagen ableiten: Die Brandbekämpfungsanlage könnte als bedrohlicher Stimulus interpretiert werden, den die Tunnelnutzer vermeiden möchten. Dies könnte dazu führen, dass das Fahrzeug nicht verlassen wird, wenn sich Tunnelnutzer im Einflussbereich der Brandbekämpfungsanlage befinden, weil sie Angst haben sich dem Wasserdampf auszusetzen.

2.2.6 Menschliches Verhalten bei Ereignisfällen im Tunnel

Aus großen Brandereignissen, wie zum Beispiel dem Mont-Blanc Tunnelbrand (1999), ist bekannt, dass sich Tunnelnutzer in Notfallsituationen häufig fehlerhaft verhalten. So waren 29 der 39 Unglücksoffer des Mont-Blanc-Tunnelbrands zum Zeitpunkt des Todes in ihren Fahrzeugen. Ähnliche Beobachtungen machte auch DIX (2011), der den Tunnelunfall im Burnley-Tunnel in Melbourne (2009) untersuchte. Nach seinen Beobachtungen zeigten auch hier viele Personen problematisches Verhalten, indem sie zum Beispiel nach Einleitung der Selbstrettung zu ihren Autos zurückkehrten oder sogar näher an die Unfallstelle heranfuhrten, um Fotos des Unfalls zu machen [14].

Ein zweiter auffälliger Aspekt im Zusammenhang mit Fluchtverhalten in Tunneln ist, dass Tunnelnutzer die Gefahr erkennen, aber nicht wissen wie sie sich richtig verhalten sollen [43]. Studien mit Brandereignissen in Kaufhäusern zeigen, dass Personen zu dem Eingang flohen, durch den sie das Gebäude betreten hatten und dabei teilweise an mehreren Notausgängen vorbeigingen [19]. Diese Untersuchungen unterstützen Theorien, die besagen, dass Personen in Notfallsituationen zu bekannten Orten fliehen [59].

2.2.7 Modelle zum Fluchtverhalten

Allgemein kann man das Fluchtverhalten von Personen in mehrere Phasen untergliedern. Eine Präevakuierungsphase, die alle Ereignisse vor dem Start der Flucht beinhaltet und mit der Entscheidung zur Flucht endet. Von besonderem Interesse ist die Dauer dieser Phase und welche Eigenschaften des Ereignisses dazu führen ob und wann der Tunnelnutzer die Entscheidung zur Flucht fällt.

In der darauf folgenden Evakuierungsphase kann man zwischen einer Präbewegungsphase und einer Bewegungsphase unterscheiden. In der Präbewegungsphase sucht der Tunnelnutzer Informationen und wählt einen Fluchtweg aus. Die Bewegungsphase beinhaltet alle Verhaltensweisen, die vom Tunnelnutzer während der Flucht gezeigt werden, bis er ein Fluchtziel erreicht hat.

Einen ähnlichen Ansatz hat KULIGOWSKI (2009) zu einem Modell zusammengefasst. Das Modell umfasst vier Phasen, wobei die ersten zwei Phasen

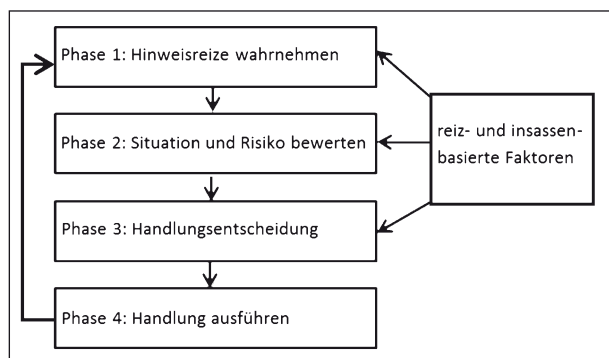


Bild 2: Phasen der Evakuierung nach KULIGOWSKI (2009)

der Präevakuierungsphase entsprechen, die dritte Phase der Präbewegungsphase und die vierte Phase der Bewegungsphase [31].

Ein an der Universität Würzburg entwickeltes Modell zum Fluchtverhalten in Straßentunnel geht von der Annahme aus, dass Tunnelnutzer in Notfallsituationen entweder impulsives oder reflektives Verhalten zeigen. Impulsives Verhalten ist dabei durch ein „weg von der Gefahr“ gekennzeichnet, wobei Eigenschaften der Umgebung, wie zum Beispiel Sicherheitstechnik, nicht beachtet werden. Reflektives Verhalten zeichnet sich durch eine Informationssuche aus, auf deren Grundlage eine Verhaltensalternative gewählt wird. Hierbei kann das Wissen der Personen über das richtige Verhalten in Notfallsituationen eine Rolle spielen. Die meisten Tunnelnutzer zeigen reflektives Verhalten.

Ob eine Person reflektives oder impulsives Verhalten zeigt, ist auf der einen Seite von internen Faktoren der Person abhängig, aber auch von externen Faktoren, wie der Sichtbarkeit des Rauchs oder des Feuers.

Aus den vorliegenden Befunden lassen sich folgende Überlegungen für die Effekte einer aktivierten Wassernebelanlage ableiten: Einen externen die Flucht beeinflussenden Faktor könnte auch die Brandbekämpfungsanlage darstellen und so die Art des Fluchtverhaltens der Tunnelnutzer verändern. Die Brandbekämpfungsanlage erschwert möglicherweise die Aufnahme von relevanten Informationen über die Situation. Dadurch könnte die Entscheidung, ob eine Flucht angemessen ist, erschwert werden.

2.3 Regelwerke und Leitlinien für BBA in Straßentunneln

Mit Ausnahme von Japan und Teilen von Australien existieren derzeit in keinem Land nationale Vorschriften, welche die Installation von BBA grundsätzlich fordern. Ungeachtet dieser Vorschriftenlage besteht allgemein eine Tendenz, Tunnel zunehmend mit solchen Systemen auszustatten.

Die Regelungen zu BBA sind in die allgemeinen nationalen Regelwerke zur Sicherheit und dem Betrieb von Tunneln eingebettet. Das „Committee on Operational Safety of Underground Facilities“ (COSUF) hat in seiner Arbeitsgruppe 2 (Operation and Safety of Road Tunnels) im Herbst 2011 unter dem Titel „Existing Regulations and Recognised Recommendations“ eine umfassende Zusammenstellung international relevanter Regelwerke veröffentlicht [25]. Die Veröffentlichung dokumentiert das Ergebnis einer weltweiten Befragung und die Ergebnisse aus 27 Ländern.

Anstelle nationaler Regelwerke werden vielfach internationale Regelwerke und Leitlinien angewendet. Insbesondere im englischsprachigen Raum sind Festlegungen der National Fire Protection Association (NFPA) relevant. Eine maßgebliche Norm im Bereich Brandbekämpfungsanlagen für Tunnel ist in den Vereinigten Staaten die NFPA 502 „Standard for Road Tunnels, Bridges and Other Limited Access Highways“. Die aktuelle Neufassung der NFPA 502 aus dem Jahr 2014 behandelt wasserbasierte Brandbekämpfungsanlagen eigenständig in Kapitel 9. Dabei werden für Tunnel der Kategorie C und Kategorie D (Tunnellänge größer 300 bzw. 1.000 m) automatische Brandbekämpfungsanlagen unter bestimmten Bedingungen verpflichtend. Dabei ist es erlaubt, FFFS als Kompensationsmaßnahme für das Lüftungssystem in Betracht zu ziehen, insofern sie als Sicherheitsmaßnahme im Rahmen eines ganzheitlichen Sicherheitskonzeptes evaluiert wird [42].

Auch der internationale Welt-Straßenverband PIARC stellt maßgebliche Leitlinien für BBA in Straßentunneln zur Verfügung. Über lange Zeit nahm die PIARC dabei eine kritische bis ablehnende Haltung gegenüber BBA ein [50]. Erst in einem Positionspapier von 2008 hat sich bei der Bewertung von BBA durch die PIARC eine Wende vollzogen [51]. Im Ergebnis kommt die PIARC nun zu dem Schluss, dass der Einsatz von ortsfesten Brandbekämpfungsanlagen unter bestimmten

Randbedingungen sinnvoll ist. Seit der Veröffentlichung im Jahr 2008 sind (zum Thema BBA) seitens der PIARC keine offiziellen Stellungnahmen mehr publiziert worden. Die Diskussionen halten aber unverändert an. Im 2012 gestarteten Zyklus beschäftigt sich eine eigene Arbeitsgruppe intensiv mit dem Thema „automatische Brandbekämpfungsanlagen“. Der zugehörige eigenständige Bericht (Titel: „Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels – Current Practices and Recommendations“) steht zum Zeitpunkt der Fertigstellung der vorliegenden Studie (März 2014) noch aus, den Studienverfassern liegt lediglich ein erster Entwurf dieses Berichtes vor. Es ist zu erwarten, dass die PIARC ihre Position zum Einsatz automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln neu definieren wird. Die Tendenz geht dabei in Richtung einer sehr spezifischen und detaillierten Bewertung im Einzelfall. Bestandteil des neuen Berichts der PIARC sind unter anderem die Ergebnisse einer weltweit im Herbst 2012 durchgeführten Befragung. Die Ergebnisse dieser Befragung, dokumentiert in Annex 1 („Questionnaire Data“) des gesamten Berichtes, wurden von der BASt offiziell zur Verfügung gestellt [55] und konnten als Grundlage für die vorliegende Untersuchung herangezogen werden (s. Anhang).

Als weitere Grundlage zur Bewertung und Planung von Brandbekämpfungsanlagen dienen Veröffentlichungen, welche als Resultat von Forschungsprojekten entstanden sind. In diesem Zusammenhang sind vorrangig zu nennen:

- UPTUN – Engineering guidance for water based fire fighting systems for the protection of tunnels and sub-surface facilities

Im Zuge des europäischen Forschungsprojektes UPTUN wurde mit finanzieller Förderung der Europäischen Kommission im Jahr 2008 die „Ingenieurleitlinie für wasserbasierte Brandbekämpfungssysteme für den Schutz von Tunneln und unterirdischen Anlagen“ [68] entwickelt. Diese Leitlinie enthält grundlegende Informationen zu Entwurf, Installation und Instandhaltung von wasserbasierten Brandbekämpfungssystemen zum Einsatz in Tunneln. Sie diskutiert diverse Aspekte von der Wasserversorgung bis zur Wasserableitung.

- SOLIT – Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen

Als wissenschaftlicher Abschlussbericht des SOLIT2-Forschungsvorhabens, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, wurde im Jahr 2012 der „Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung“ [63] veröffentlicht. Der Leitfaden soll Ingenieuren und anderen mit dem Brandschutz in Straßentunneln vertrauten Personen eine Methodik zur Verfügung stellen, Bestandteile eines Tunnel-sicherheitssystems ganzheitlich zu betrachten, zu bewerten und zu planen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Einbeziehung von stationären Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen und den sich daraus ergebenden Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitsmaßnahmen. Ausgehend von der Darstellung der technischen Grundlagen wird aufgezeigt, wie der mögliche Einsatz einer BBA bewertet und wie eine BBA geplant werden kann. Zu folgenden Themen sind insgesamt sieben Anhänge als separate Dokumente erhältlich: Statusanalyse, Ausgewählte Ergebnisse aus den Brandversuchen, Planungsleitfaden für stationäre Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln, Beispielhafte Anwendung der Risikoanalyse, Sicherheitsbewertung von Betriebstechnik, Lebenszykluskosten von Betriebstechnik, sowie Brandszenarien zur Überprüfung der Wirksamkeit von BBA [63].

2.4 Praktische Erfahrungen

2.4.1 Durchgeführte Großbrandversuche

Maßgeblich ausgelöst durch die Serie von Brandkatastrophen in den Jahren 1999/2001 (Tauerntunnel/Gotthard/Mont Blanc-Tunnel) wurden zahlreiche Versuchsreihen mit BBA im Modellmaßstab sowie mit Großversuchen durchgeführt (s. Anhang).

Zeitlich zu Beginn der Testreihen kamen mehrheitlich Sprühflutanlagen zum Einsatz. Mit zunehmender Untersuchungstiefe verlagerte sich der Schwerpunkt ab etwa 2003 hin zu Brandversuchen mit Wassernebelanlagen. In den letzten Jahren ist, bedingt durch das Bestreben die Systeme aus Kostengründen technisch zu vereinfachen, erneut eine Tendenz zu Brandversuchen mit Sprühflutanlagen zu erkennen.

Zahlenmäßig sind die meisten Versuche für Wasserebelanlagen durchgeführt worden, gefolgt von Sprühflutanlagen. Für Druckluftschäumlöschanlagen liegt lediglich eine einzige dokumentierte Versuchsreihe vor [5]. Im Zuge der Inbetriebnahme des Pörzbergtunnels wurden Kleinbrandversuche durchgeführt (s. Kapitel 2.4.4).

Die durchgeführten Versuche decken ein breites Spektrum an unterschiedlichen Randbedingungen ab. Die Brandlasten von Flüssigkeitsbränden und Feststoffbränden variieren zwischen 5 und 100 MW, in Einzelfällen bis zu 200 MW. Auch die zum Einsatz kommenden Lüftungssysteme, sowie die resultierenden Luftgeschwindigkeiten erschweren einen direkten Vergleich der Versuchsreihen.

Insgesamt lassen die unterschiedlichen Versuchsergebnisse den Schluss zu, dass die getesteten Anlagen nach ausreichender Anpassung an die lokale Gegebenheit in technischer Sicht eine gute Wirksamkeit bei der Brandbekämpfung aufweisen.

2.4.2 Reale Brandereignisse in Straßentunneln

Bei Brandversuchen werden üblicherweise Brand-szenarien mit großen bis sehr großen Brandlasten untersucht. Außerdem werden neben Feststoffbränden meist aufgrund versuchstechnischer Vorteile auch Flüssigkeitsbrände gleichwertig in die Untersuchungen einbezogen, obwohl räumlich und zeitlich ausgedehnte Lachenbrände praktisch nicht auftreten. Für die Zielsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es aber wesentlich, ein realistisches Bild der in einem Tunnel zu erwartenden Brandereignisse zu entwickeln und dieses der Bewertung zugrunde zu legen. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung realer Brände auf Basis von statistischen Daten von Brandereignissen auf dem hochrangigen österreichischen Straßennetz, die im Zuge der Weiterentwicklung des österreichischen Tunnelrisikomodells der RVS 09.03.11 durchgeführt wurde, für die Zwecke des vorliegenden Forschungsprojektes ausgewertet [34].

Die Datenbasis bildet eine vollständige und detaillierte Erfassung aller Brände in Tunneln auf dem hochrangigen österreichischen Straßennetz im Zeitraum 2006 bis 2013. Der Großteil der rund 150 in der Statistik enthaltenen Tunnelanlagen sind Richtungsverkehrstunnel. Die Datenbasis umfasst insgesamt 65 Brände, davon 60 infolge Selbstentzündung (infolge verschiedener technischer Defekte) und 5 infolge von Verkehrsunfällen. Die

60 Brände infolge Selbstentzündung beinhalten 32 Pkw-Brände und 28 Lkw- bzw. Busbrände (bei einem Medianwert des Lkw-Anteils am Gesamtverkehr von 14 %). Somit sind Lkw-Brände in der Datenbasis deutlich überrepräsentiert.

Von den Pkw-Bränden entwickelte sich etwas mehr als ein Drittel zu einem Vollbrand des gesamten Fahrzeuges. Die übrigen Ereignisse waren Bagatellbrände oder wurden frühzeitig gelöscht. Kein einziger Brand war mit nennenswerten Schadenswirkungen (weder Personen- noch Sachschäden) verbunden. Pkw-Brände sind daher für die gegenständliche Untersuchung wenig relevant.

Bei den Lkw-Bränden war rund die Hälfte der Ereignisse Bagatellbrände bzw. wurden frühzeitig gelöscht. Die zweite Hälfte entwickelte sich zu größeren Bränden, wobei davon rund 80 % lediglich die Führerkabine betraf (und dann meist von der Feuerwehr gelöscht wurden) und 20 % das gesamte Fahrzeug erfassten (Vollbrand des gesamten Fahrzeuges). Wie bei den Pkw-Bränden gab es auch bei den Lkw-Bränden keine Personenschäden und Sachschäden nur in geringem Umfang. Kein einziges der Ereignisse war ein ausgeprägter Flüssigkeitsbrand (wenngleich die Freisetzung und Entzündung von Treibstoff aus beschädigten Treibstofftanks eine Rolle bei der Brandentwicklung spielen kann).

Für die vorliegende Untersuchung können aus dem realen Brandgeschehen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es sind für die Bewertungen in erster Linie die Ergebnisse von Brandversuchen mit Feststoffbränden heranzuziehen. Flüssigkeitsbrände haben in der Praxis wenig Relevanz (lediglich in Zusammenhang mit Gefahrguttransporten).
- Charakteristisch für die in der Praxis auftretenden Brände (bei Selbstentzündung) ist eine gewisse Entwicklungszeit des Ereignisses, die ein Eingreifen in einer frühen Brandphase möglich macht, sowie die Tatsache, dass nur ein geringer Teil der Brände zu einem Vollbrand des Fahrzeuges führt.
- Entsprechend große Brände (Größenordnung von deutlich mehr als 30 MW) treten in der Praxis äußerst selten auf. Die häufiger auftretenden Brandereignisse (Brände bis etwa 20-30 MW) können in Richtungsverkehrstunneln mit den in modernen Tunneln vorhandenen konventio-

nellen Sicherheitseinrichtungen gut kontrolliert werden. Dies ist vor allem im Hinblick auf Life-cycle-cost-Betrachtungen relevant.

2.4.3 Expertenbefragungen

Um spezifische Informationen zu bereits in Betrieb befindlichen automatischen BBA zu erhalten, wurden mit einer Auswahl von Betreibern und Herstellern solcher Systeme persönliche Befragungen (Interviews) durchgeführt. Als einheitliche Grundlage für die Interviews wurde eine Frageliste erstellt, die die grundlegenden Punkte zum Tunnel, der BBA, dem Betrieb der BBA, den Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitssystemen, der Interaktion mit menschlichem Verhalten und der Wirtschaftlichkeit enthält (s. Muster im Anhang).

Die befragten Betreiber und Hersteller wurden nach dem Grundsatz der Ausgewogenheit ausgewählt (s. Tabelle 1).

Die Ergebnisse der Expertenbefragungen wurden ausgewertet und der vorliegenden Studie zugrunde gelegt. Eine Zusammenfassung aller Expertenbefragungen ist im Anhang zu finden.

2.4.4 Einsatz von BBA in Straßentunneln bei realen Bränden

Burnley-Tunnel

Der Burnley-Tunnel ist Teil der Melbourne-City-Link-Tunnels (Australien). Er ist ein Richtungsverkehrstunnel mit 3,4 km Länge, je Tunnelröhre drei Fahrstreifen mit je 3,5 m Breite und Abschnittsweise sehr hohen Längsneigungen (6,2 % bzw. 5,2 %). Der Tunnel hat eine sehr hohe Verkehrsbelastung (mehr als 100.000 KFZ/Tag) mit hohen Schwerverkehrsanteilen. Der Tunnel ist mit einer

Rauchabsaugung ausgerüstet (Absaugkapazität 130 m³/s), wobei die Längsströmung im Tunnel durch Stahlventilatoren im Tunnelquerschnitt kontrolliert wird (Zielgeschwindigkeit 1,5 m/s vom Brandherd weg – in Fahrtrichtung). Der Tunnel ist mit einer Sprühflutanlage ausgerüstet, die in max. 3 Löschbereichen von 30 m Länge aktiviert werden kann und die eine Applikationsrate von 8 l/min aufweist. Der Tunnel verfügt über Notausgänge die teilweise zum benachbarten Domain-Tunnel führen, wobei deren genaue Abstände nicht angegeben sind.

Am 23.03.2007 ereignete sich ein folgenschwerer Unfall [14], in den mehrere Fahrzeuge verwickelt waren und der sofort einen größeren Brand auslöste. Durch einen am linken Fahrstreifen (Linksverkehr) stehengebliebenen Lkw kommt es im Tunnel zuerst nur auf einem Fahrstreifen zu einer Staubbildung. In den nächsten 2 Minuten passieren etwa 100 Fahrzeuge problemlos den stehenden Lkw. Anschließend kommt der Verkehr auf fast allen Fahrstreifen nahezu zum Stillstand. Ein weiterer Lkw nähert sich auf dem gesperrten linken Fahrstreifen mit überhöhter Geschwindigkeit und verursacht eine Serie von Kollisionen, die 2 Sattelschlepper und 5 Pkw direkt betreffen. Es kommt sofort zu explosionsartiger Brandentwicklung (an mehreren Stellen) in der Zone hinter dem liegengelassenen Lkw. Nachfolgende Fahrzeuge vollziehen Notbremsmanöver, es kommt aber zu keinen weiteren Kollisionen.

Etwa 1,5 Minuten nach dem Unfall wird der erste Abschnitt der BBA aktiviert, wobei die Aktivierung erst nach weiteren 50 Sekunden erfolgreich ist. Grund dafür waren Probleme bei der Aktivierung der Sicherheitssysteme infolge von Softwareproblemen, welche jedoch mithilfe einer Rückfallebene durch die Operatoren gelöst wurden. Im Zeit-

Aquasys	Hersteller Wasserebelanlagen
Felbertauernstraßen AG	Betreiber Felbertauerntunnel (Wasserebel)
Fogtec	Hersteller Wasserebelanlagen
Freistaat Thüringen	Betreiber Pörzbergunnel (Druckluftschäum)
OneSeven	Hersteller Druckluftschäumenlagen
Rijkswaterstaat	Betreiber Swalmen & Roermond Tunnel (Wasserebel)
Stadt Stockholm	Betreiber Klara Tunnel (Sprühflut)
Trafikverket	Betreiber Norra Länken & Stockholm Bypass (Sprühflut)

Tab. 1: Liste mit Betreibern und Herstellern für Expertenbefragungen

raum von 2:30 Minuten bis 2:45 Minuten nach dem Unfall sind alle 3 Abschnitte aktiviert. Ungefähr 10:30 Minuten nach dem Unfall erreichen die ersten Feuerwehrleute den Ereignisort und beginnen mit der Brandbekämpfung.

Bei dem Unfall starben drei Personen infolge der mechanischen Einwirkungen bei der Kollision und nicht infolge der Brandwirkungen. Durch den erfolgreichen Einsatz und das gute Management der verfügbaren Sicherheitssysteme (Brandbekämpfungsanlage und Rauchabsaugung) konnte eine Ausweitung des Brandes und eine ungünstige Rauchausbreitung trotz sehr ungünstiger Rahmenbedingungen (der Unfall ereignete sich im fallenden Abschnitt der Röhre mit einer Längsneigung von 6,2 %) verhindert werden.

Nachfolgend sind einige für das gegenständliche Forschungsvorhaben relevante Aspekte aus dem sehr umfangreichen Ereignisbericht herausgegriffen:

Verhalten der involvierten Personen:

- In unmittelbarer Umgebung des Ereignisortes hat die Selbstrettung bereits 15 Sekunden nach dem Unfall eingesetzt (Gefährdung durch Unfälle und explosionsartige Brandentwicklung unmittelbar wahrnehmbar). Fahrzeuglenker verhalten sich richtig – versuchen anderen zu helfen bzw. bewegen sich am erhöhten Randweg entgegen der Strömungsrichtung vom Ereignisort weg (1 Minute nach dem Unfall); die BBA ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht aktiviert (s. Bild 3).
- Fahrzeuglenker in größerer Entfernung zum Ereignisort versuchen sich mit dem Fahrzeug wegzubewegen (umdrehen bzw. rückwärtsfahren).



Bild 3: Flucht der Fahrzeuglenker am Randweg im Burnley-Tunnel

- Massenflucht setzt ca. 3:30 Minuten nach dem Unfall ein; Personen im Nahbereich bewegen sich sehr rasch; in Bereichen mit größerer Entfernung gehen sie deutlich langsamer.
- Nur wenige Personen nutzen die Notausgänge zum zweiten Tunnel, obwohl sie durch Durchsagen und Fluchtwegkennzeichnung dazu angeleitet werden.

Interaktion Brandentwicklung/Rauchausbreitung, BBA und Lüftungssystem:

- Entwicklung der Wärmefreisetzungsrates (auf Basis einer modellierten Nachrechnung des Ereignisses), schlagartiger Anstieg auf 10 MW, danach innerhalb von 60 Sekunden auf 20-25 MW, nach Aktivierung der Anlage Reduktion auf weniger als 5 MW (s. Bild 4). Die BBA minimierte die Brandentwicklung und verhinderte eine Ausbreitung des Feuers.
- Entwicklung der Verhältnisse auf der Abstromseite (dargestellt anhand einer Serie von Kamerabildern in Zeitabschnitten); die Kamera befindet sich hinter den beim Brand aktivierten Rauchabzugsöffnungen (ca. 150 m hinter dem Ereignisort); 1:30 Minuten nach dem Unfall verdunkelt sich das Bild deutlich; 2:30 Minuten danach ist das Bild komplett schwarz; 11:30 Minuten danach verbessern sich die Sichtverhältnisse langsam wieder – die Rauchabsaugung wird wirksam.
- Etwa 4-6 Minuten nach dem Unfall sind die angestrebten Strömungsverhältnisse des Rauchabsaugungssystems erreicht; bis der Rauch

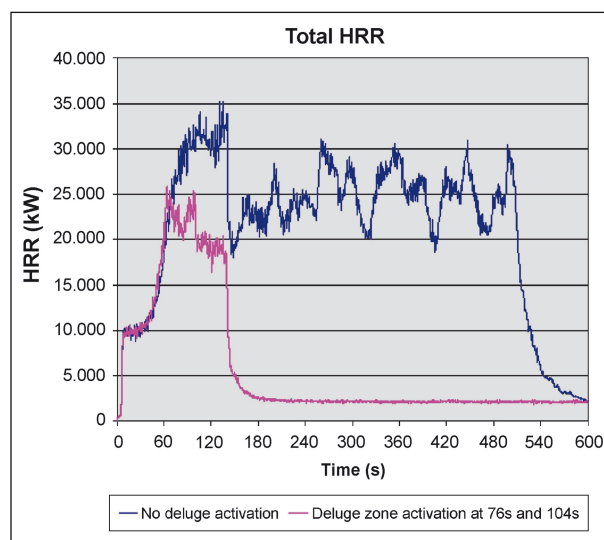


Bild 4: Brandentwicklung im Burnley-Tunnel mit/ohne BBA [14]

tatsächlich zurückgesaugt ist, dauert es 11-12 Minuten (s. vorherige Erläuterungen); es sind zwei Absaugklappen geöffnet (die Effekte der Rauchabsaugung sind auch dargestellt in einer Bildsequenz einer Kamera ca. 300 m abstrom-seitig des Ereignisortes).

- Zum Zeitpunkt der Aktivierung der BBA waren die Verhältnisse im Aktivierungsbereich bereits äußerst schlecht (Tunnel komplett verraucht); durch Aktivierung der Anlage scheinen sie nicht noch weiter verschlechtert worden zu sein; zu diesem Zeitpunkt befanden sich keine Personen mehr im Aktivierungsbereich.
- Die Tunnellüftung verhinderte erfolgreich eine Umkehr der Strömungsrichtung und eine Ausbreitung des Rauches in Richtung der stehenden Fahrzeuge in Fahrtrichtung hinter dem Ereignisort. Die Rauchabsaugung ermöglichte auch einen Fremdrettungseinsatz zum Zweck des Brandlöschens von beiden Seiten.
- Es gab nur geringfügige Schäden am Tunnelbauwerk (lokale Abplatzungen).

Felbertauerntunnel

Seit dem Einbau der BBA im Felbertauerntunnel im Jahr 2005 haben zwei kleinere Brandereignisse stattgefunden, bei denen es auch zu einer Aktivierung der BBA gekommen ist [28]. Bei diesen Ereignissen handelt es sich um einen Pkw-Brand und einen Lkw-Brand, welche im Folgenden kurz beschrieben werden.

- Pkw-Brand

Ein Pkw bleibt mit einem Brand im Motorraum im Tunnel liegen und obwohl der Rauch sich im (geschlossenen) Motorraum befindet, wird der Brand vom Brandmeldekabel detektiert und ein Brandalarm ausgelöst. Die BBA löst nach Ablauf der Latenzzeit (Operator greift nicht ein) an der richtigen Stelle aus.

- Lkw-Brand

Ein Lkw mit Turboladerschaden bleibt im Tunnel mit starker Rauchentwicklung liegen. Ein anderer Verkehrsteilnehmer meldet das Ereignis über die Notrufeinrichtung und löst damit einen Brandalarm aus. Die BBA löst nach Ablauf der Latenzzeit (Operator greift nicht ein) automatisch aus – allerdings im Bereich der Notrufnische, wo der Brandalarm ausgelöst wurde und

nicht an der Stelle, an der sich der brennende Lkw tatsächlich befindet.

Bei einer Auslösung über eine Notrufnische ist die exakte Lage des Brandorts nicht bekannt. Der Felbertauerntunnel verfügt über keine Videoüberwachung, sondern stattdessen über ein nicht bildgebendes Detektionssystem für liegengebliebene Fahrzeuge, wodurch eine visuelle Identifikation des Brandortes schwierig ist.

Bei einem der beiden Ereignisse fährt ein Fahrzeug absichtlich in den Bereich der aktivierten BBA ein. Bei Befragungen gibt der Lenker des Fahrzeugs an, dass er die Bedingungen „ausprobieren“ wolle.

Duplex A86-Tunnel Paris

Seit der Inbetriebnahme des Duplex A86-Tunnels in Paris haben sich zwei Fahrzeugbrände ereignet, bei dem die installierte BBA aktiviert wurde. Beide Ereignisse wurden durch einen in Brand geratenen Pkw ausgelöst und sind ähnlich abgelaufen [49].

Die Aktivierung der BBA erfolgt im Tunnel ausschließlich manuell auf Basis der Informationen, die der Operator durch Videokameras oder durch für Ereignisse am Tunnelportal stationiertes Betriebspersonal im Tunnel erhält. Voraussetzung für die Aktivierung der BBA ist der Stillstand des Verkehrs sowie die eindeutige Bestätigung, dass ein Brandereignis vorliegt.

Zum Fluchtverhalten der betroffenen Personen liegen keine Angaben vor. Der Betreiber hat auf Anfrage angegeben, dass sich alle Betroffenen in die Fluchtbereiche begeben haben. Es ist jedoch nicht dokumentiert, inwieweit dies auf eigene Initiative oder erst nach Aufforderung durch das Betriebspersonal erfolgt ist. Die beiden Brände verursachten weder Schäden am Bauwerk noch wurden Personen verletzt.

Kleinbrandversuche im Pörzbergtunnel

Für die Endabnahme der Druckluftschäumenanlage und anschließender Inbetriebnahme des Pörzbergtunnels erfolgen im November 2010 in situ Brandversuche [69]. Dabei wurden 3 Tests durchgeführt:

1. Brandversuch nach RABT 2006 zur Überprüfung des automatischen Brandmeldesystems,

2. Brandversuch mit Heptan zur Überprüfung der Löschbereichserkennung und der Löschwirksamkeit der BBA in der Brandklasse B,
3. Brand eines Klein-Pkw zum Nachweis der Löschbereichserkennung und der Löschwirksamkeit der BBA in der Brandklasse A.

Beim Test Nr. 3 handelte es sich um einen Vollbrand eines Pkw. Die installierte Druckluftschäumenanlage konnte den Brand stark eindämmen, aber nicht vollständig löschen. Die Restlöscharbeiten wurden durch die Feuerwehr Rudolstadt vorgenommen. Laut Angaben der Einsatzkräfte gab es beim Vorgehen zum Brandort keine Zeitverluste und der Löschschaum verursachte keine Rutschgefahr im Tunnel. Der Schaumteppich hatte eine gleichmäßige Ausbildung in einer Höhe von 9 bis 15 cm [45].

Fehl- und Täuschungsauslösungen

Die Betreibererfahrungen haben ergeben, dass Fehl- und Täuschungsauslösungen praktisch nicht vorkommen. Fehl- und Täuschungsauslösung bedeutet, dass eine BBA ohne äußere Ursache selbst aktiviert wird.

Vereinzelte treten jedoch Täuschungsauslösungen auf, bei denen das Brandmeldesystem infolge von Temperatureinwirkung korrekt anspricht, diese Temperaturerhöhung jedoch nicht aus einem Brand resultiert. Derartige Effekte können insbesondere bei Fahrzeugen auftreten, die heiße Abgase über vertikale Auspuffrohre in Richtung Tunneldecke ausblasen.

3 Automatische Brandbekämpfungsanlagen

3.1 Definition nach PIARC

Die PIARC verwendet die folgende Definition für „Fixed Fire Fighting Systems“ (FFFS) in Analogie zum hier verwendeten deutschen Begriff „Brandbekämpfungsanlage“ (BBA): Der Begriff FFFS bezieht sich auf Technologien, die Löschmittel wie Wasser, Wasser mit einem Zusatz oder andere Löschmittel verwenden und als Teil der Tunnelinfrastruktur fest eingebaut sind. Bei Aktivierung im Brandfall nach automatischer oder manueller Auslösung aus der Ferne sind keine zusätzlichen Komponenten erforderlich. Spezifischer Zweck der Systeme ist als Teil der fest installierten Aus-

stattung die Brandbekämpfung über einem vordefinierten Bereich. Daher beinhaltet der Begriff FFFS nicht manuelle Löschmethoden, die nur teilweise Bestandteil der festen Ausrüstung sind (Beispielsweise Löschleitungen und Hydranten) [51]. Ergänzend zu den von der PIARC genannten Beispielen fallen auch Druckluftschäumlöschanlagen unter die zuvor genannten Brandbekämpfungsanlagen.

Im englischen Sprachgebrauch werden Sprühflut- und Sprinkleranlagen auch als Sprinkler-Anlagen bezeichnet, weil das Ausbringen des Wassers mit Sprinklerdüsen erfolgt. Insofern können im Englischen mit der Bezeichnung „Sprinkler“ auch „Sprühflutanlagen“ gemeint sein.

3.2 Schutzziele für den Einsatz automatischer BBA

Aus den im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführten Expertenbefragungen einerseits und der Literaturlauswertung andererseits, lassen sich folgende Hauptaufgaben von automatischen BBA ableiten:

- Hemmung der Brandentwicklung bzw. Eindämmen des Brandes durch Begrenzung bzw. Reduzierung der Wärmefreisetzungsrate (HRR),
- Reduzierung der Rauchgasproduktion und damit Verbesserung der atmosphärischen Bedingungen im Einflussbereich des Brandes,
- Verhinderung eines Feuerübersprungs auf andere Fahrzeuge,
- Verbesserung der Einsatzbedingungen für die Feuerwehr,
- Schutz des Bauwerks durch verminderte Temperatureinwirkung,
- Aufrechterhaltung der Betriebsbedingungen anderer Sicherheitssysteme, z. B. Vermeidung einer Überhitzung des Lüftungssystems.

Ausgehend von diesen Hauptaufgaben einer automatischen BBA können konkrete Schutzziele für diese Anlagen definiert werden. Diese Schutzziele stellen gleichzeitig Kriterien dar, anhand derer die Wirksamkeit einer Brandbekämpfungsanlage bewertet werden kann. Schutzziele dienen zur präventiven Abwehr einer Gefahr bzw. zur Minimierung der Schadenswirkungen.

Schutzziele	Personenschutz	Bauwerksschutz
Eindämmung der Brandentwicklung	X	X
Verhinderung der Brandausbreitung	X	X
Erleichterung eines Feuerwehreinsatzes	X	X
Sicherstellung geeigneter (akzeptabler) und stabiler Fluchtbedingungen	X	
Aufrechterhaltung der erforderlichen Betriebsbedingungen anderer Sicherheitssysteme	X	X

Tab. 2: Über- und untergeordnete Schutzziele für den Einsatz automatischer BBA

Übergeordnete Schutzziele sind der Personenschutz einerseits und der Bauwerksschutz andererseits. Die untergeordneten Schutzziele tragen in unterschiedlicher Weise der Erfüllung dieser übergeordneten Schutzziele bei.

3.2.1 Personenschutz

Bei sich uneingeschränkt entwickelnden Tunnelbränden können rasch sehr große Rauchgasmenngen und hohe Temperaturen entstehen, die im Abstrombereich der Rauchgase gesundheitsgefährdende bis lebensbedrohliche Bedingungen bewirken. Um den Schutz von Personen in einem Brand zu gewährleisten, muss eine überlebensfähige Atmosphäre im Tunnel möglichst lange erhalten bleiben. Dazu müssen im Aufenthaltsbereich flüchtender Personen die Konzentration toxischer Rauchgase und die Temperaturen so niedrig gehalten werden, dass ein Überleben möglich ist.

3.2.2 Bauwerksschutz

Bei sich uneingeschränkt entwickelnden Tunnelbränden können rasch hohe Wärmefreisetzungs-raten mit sehr hohen Temperaturen entstehen, die örtlich schwere Schäden (wie Zerstörung der Tunnelschale oder Herabfallen einer Zwischendecke) am Bauwerk verursachen können, sodass umfangreiche Sanierungsmaßnahmen und längere Tunnelsperren notwendig werden. Um dies zu verhindern oder zumindest stark zu reduzieren, muss die Temperaturentwicklung gehemmt werden oder die betroffenen Bauteile vor übermäßiger Temperatureinwirkung geschützt werden. Dies betrifft vor allem den Deckenbereich, da dort die höchsten Temperaturen und somit die schwersten Schäden zu erwarten sind. Die maximal zulässige Temperatur hängt dabei maßgeblich von der jeweiligen Bauweise und den verwendeten Materialien im Tunnel ab.

3.2.3 Eindämmung der Brandentwicklung (am betroffenen Fahrzeug)

Fahrzeugbrände entstehen in der Regel lokal an einer bestimmten Stelle im Fahrzeug (z. B. Motor, Reifen, oder Ladung) und breiten sich dann sukzessive aus, bis das Fahrzeug im Vollbrand steht, wobei in der letzten Brandentwicklungsphase sehr rasch aus einem Entstehungsbrand ein Vollbrand werden kann (Flashover). In der ersten Phase der Brandentwicklung kann der Brand meist noch mit einfachen Mitteln (Handfeuerlöscher) gelöscht oder zumindest an der weiteren Ausbreitung gehindert werden, sodass die bei den Schutzzielen „Personenschutz“ und „Bauwerksschutz“ dargestellten Bedrohungsszenarien erst gar nicht entstehen. Bei Freisetzung von Treibstoff aus beschädigtem Fahrzeugtank (Folgebrand nach einem Unfall) oder bei Flüssigkeitsbränden (Entzündung größerer Mengen brennbaren Gefahrgutes) erfolgt die Brandentwicklung im Gegensatz dazu sehr rasch. Auch die Art der Ladungen beeinflusst den Brandverlauf und kann zu einer raschen Brandentwicklung beitragen.

3.2.4 Verhinderung der Brandausbreitung (auf weitere Fahrzeuge)

Bei einem Brand mit hoher Wärmefreisetzungsrate kann es durch Entzündung brennbarer Pyrolysegase oder durch eine Selbstentzündung von benachbarten Fahrzeugen infolge hoher Temperaturen und Wärmestrahlung in Abhängigkeit von der Fahrzeugkonstellation in der Umgebung des Brandes und den Strömungsverhältnissen im Tunnel zu einer weiteren Brandausbreitung kommen. In diesem Fall kommt es nicht nur zu einer sprunghaften Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate sondern auch zu einer wesentlichen Ausweitung des betroffenen Tunnelbereichs.

3.2.5 Erleichterung eines Feuerwehreinsatzes

Brände in Tunneln treten in der Regel als verdeckte Brände auf, wodurch eine direkte Einwirkung einer BBA auf die Oberfläche des Brandgutes oft nicht möglich ist. Durch die BBA wird die Brandentwicklung zwar gehemmt und die weitere Brandausbreitung unterbunden, das vollständige Ablöschen des Brandes bleibt aber Aufgabe der Feuerwehr.

Die rasche Temperaturentwicklung sowie die hohe Wärmestrahlung bei Tunnelbränden können zu Bedingungen führen, die es nicht zulassen, dass die Feuerwehr sich dem Brandherd ausreichend annähern kann, um den Brand wirkungsvoll zu bekämpfen. Daher ist es Ziel einer BBA, die Temperaturentwicklung und die Wärmestrahlung so zu reduzieren, dass eine ausreichende Annäherung an den Brandherd für effiziente Brandbekämpfung möglich ist. Bei Abständen von abstromseitig ca. 20 m bzw. auf der Zustromseite von ca. 5 m zum Brandherd kann von einer wirkungsvollen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr ausgegangen werden [63].

Die Installation einer BBA kann die Feuerwehrtaktik und die Vorgehensweise beim Einsatz der Rettungskräfte beeinflussen und ändern. Es bedarf daher einer engen Abstimmung zwischen Tunnelbetreiber und Rettungskräften hinsichtlich der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne.

3.2.6 Sicherstellung geeigneter (akzeptabler) und stabiler Fluchtbedingungen

Als Voraussetzung für die Selbstrettung sind erträgliche Bedingungen (Schadstoffkonzentration und Temperatur) im Tunnel (im Bereich bis ca. 2 m Höhe) erforderlich. Darüber hinaus müssen ausreichende Sichtverhältnisse vorliegen, um flüchtenden Personen eine gute Orientierung zu erlauben und ihnen somit eine schnelle Flucht zu ermöglichen. Die im Tunnel herrschenden Bedingungen haben unmittelbare Auswirkung auf die betroffenen Personen. Die Bedingungen sollten möglichst stabil sein und plötzliche Veränderungen sollten vermieden werden. Insbesondere sollten wesentliche Rahmenbedingung einer Fluchtentscheidung (wie z. B. die Rauchausbreitungsrichtung) nicht nachträglich verändert werden.

3.2.7 Aufrechterhaltung der erforderlichen Betriebsbedingungen anderer Sicherheitssysteme

Sicherheitssysteme im Tunnel müssen üblicherweise einer bestimmten Temperaturbelastung über eine definierte Zeitdauer standhalten. Werden die Auslegungskriterien überschritten, so kann es zu Ausfällen von Sicherheitssystemen wie z. B. dem Lüftungssystem kommen. Dies ist vor allem bei sehr lang andauernden Bränden zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt relevant. Insbesondere bestehen Wechselwirkungen mit dem Schutzziel „Erleichterung eines Feuerwehreinsatzes“.

3.3 Klassifizierung automatischer BBA

Die Anwendung automatischer Brandbekämpfungsanlagen ist im Hochbaubereich weit verbreitet. Dabei handelt es sich meist um Sprinkleranlagen, bei denen das mit Wasser gefüllte zugehörige Rohrleitungssystem permanent unter Druck steht (Nassleitung). Die Öffnung der Düsen erfolgt über ein thermisch aktivierbares Element. Meist handelt es sich dabei um ein Glasfässchen, das bei Erreichen einer definierten Temperatur durch Bersten die Düse freigibt. Die Löschwirkung von Sprinkleranlagen beruht im Wesentlichen auf dem Benetzen und damit Kühlen der unter der Düse befindlichen Brandlast mit Wasser.

Herkömmliche Sprinkleranlagen sind für den Einsatz im Tunnel aus zwei Gründen nicht geeignet:

- Durch die im Tunnel in der Regel vorhandene Luftbewegung werden die heißen Rauchgase vom Brandort weggeführt, was zur Auslösung von Sprinklerdüsen abseits des Brandortes führen kann.
- Die bei einem Brand im Tunnel in kurzer Zeit erzeugte große Wärmemenge kann bewirken, dass zu viele Sprinkler gleichzeitig und irreversibel öffnen. Damit kann letztlich nicht ausreichend Wasser mit wirtschaftlichen Rohrleitungsquerschnitten und Pumpenleistungen zugeführt werden, wodurch ein kontrollierter, optimierter Einsatz eines solchen Systems letztlich nicht möglich ist.

Für den Einsatz in Straßentunneln sind daher andere Systeme erforderlich, die eine gezielte und kontrollierte Aktivierung in einem von einem Brand

System	Löschmittel	Applikationsrate	Druck an Düse
Sprühflut	Wasser	8-15 mm/min	1-5 bar
Wassernebel	Wasser	4-7 mm/min	Niederdruck $D < 12,1$ bar
			Mittlerer Druck $D > 12,1$ bar und $< 34,5$ bar
			Hochdruck $D > 34,5$ bar
Druckluftschaum	Schaum	~ 6 mm/min	1-2 bar

Tab. 3: Praxisrelevante BBA-Typen

betroffenen Tunnelabschnitt ermöglichen. Es kommen daher verschiedene Systemtypen mit unterschiedlicher Wirkungsweise infrage.

Die weitere Betrachtung im Rahmen des vorliegenden Vorhabens beschränkt sich auf folgende für den Einsatz in Straßentunneln in der Praxis relevante BBA-Typen (siehe Tabelle 3).

Andere Systemtypen von Brandbekämpfungsanlagen (Tunnel-Plug, Gasbasierte Systeme) werden aufgrund fehlender Dokumentation oder nicht existierender Pilotprojekte als nicht praxisreif eingestuft und bleiben im vorliegenden Bericht bei der weiteren Betrachtung unberücksichtigt.

Die Abgrenzung zwischen Sprühflutanlagen und Wassernebelanlagen erfolgt nach DIN CEN/TS 14972 [12] und NFPA 750 [41]. Nach NFPA 750 bezeichnet der charakteristische Durchmesser $DV_{0,99}$ jenen Durchmesser der Tropfen, der von 99 % der freigesetzten Wassermenge unterschritten wird. Die CEN definiert entsprechend den Durchmesser $DV_{0,9}$ bei einem Anteil von 90 % [65]. Bei $DV_{0,9} < 1$ mm spricht man von Wassernebelanlagen, bei $DV_{0,9} > 1$ mm handelt es sich um ein Sprühflutsystem. Die NFPA 750 unterscheidet anhand des charakteristischen Durchmessers $DV_{0,99}$ drei Klassen von Wassernebelanlagen. Anlagen mit einer Tropfengröße bis 200 μm fallen in Klasse 1. In Klasse 2 fallen Systeme zwischen 200 μm und 400 μm . Wassernebelanlagen mit Tropfengrößen darüber hinaus bis 1.000 μm werden der dritten Klasse zugeordnet.

3.4 Typen und Elemente automatischer BBA

3.4.1 Typen automatischer BBA

Wie im Kapitel 3.3 begründet, wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens von folgenden Typen automatischer BBA ausgegangen:

- Sprühflutanlagen,
- Wassernebelanlagen,
- Druckluftschaumanlagen.

Sowohl bei Sprühflut- als auch bei Wassernebelanlagen ist die Beigabe von Additiven (Netzmittel) zur Verbesserung der Löscheigenschaften des Löschmittels Wasser möglich. Dabei handelt es sich aber nur um eine Modifikation des Löschmittels zur Verbesserung der Löscheigenschaften. Das Additiv ändert jedoch nichts an der wesentlichen Charakteristik des jeweiligen Anlagentyps.

Sprühflutanlagen

Eine Sprühflutanlage besteht im Unterschied zur konventionellen Sprinkleranlage aus einem System von permanent offenen Düsen. Die Anlage ist in Abschnitte eingeteilt, die in Analogie zu den Abmessungen eines Lkw in der Regel etwa 25-30 m lang sind. Im Brandfall öffnet eine elektronische Steuerung die Bereichsventile im Abschnitt über dem Feuer und in den beiden angrenzenden Abschnitten. Wasser sprüht somit gleichzeitig aus allen Düsen in den aktivierten Bereichen.

In Abhängigkeit der lokalen Randbedingungen sind unterschiedliche Systemkonfigurationen von Sprühwasseranlagen möglich. Wenn eine vorhandene Wasserversorgung ausreichend Druckkapazität und Versorgungssicherheit (Redundanz) aufweist, kann bei Sprühflutanlagen möglicherweise auf eine Wasserbevorratung und Pumpenanlagen für die Druckerhöhung verzichtet werden (Low cost solution z. B. bei den innerstädtischen Tunnelprojekten „Norra Länken“ und „Bypass Stockholm“ in Schweden; s. Anhang).

Die bei Aktivierung der Sprühflutanlage anfallenden, vergleichsweise großen Wassermengen setzen ein ausreichend dimensioniertes Abwassersystem voraus.

Wasserebelanlagen

Der Systemaufbau einer Wasserebel-BBA entspricht prinzipiell dem Aufbau einer Sprühflut-anlage, jedoch arbeitet eine Wasserebelanlage mit deutlich höheren Wasserdrücken. Um diese zu erreichen, sind sowohl bei Niederdruck, als auch bei Hochdruck-Wasserebel-BBA eigene Pumpenanlagen und entsprechend dimensionierte Rohrleitungen erforderlich.

Bei Niederdruck- und Hochdruckwasserebelanlagen sind im Vergleich zu Sprühflutanlagen deutlich geringere Wassermengen zum Erreichen vergleichbarer Löschwirkung erforderlich. Dadurch werden wesentlich geringere Durchmesser der Rohrleitungen möglich und es ist eine geringere Kapazität des Entwässerungssystems erforderlich.

Druckluftschäumenanlagen

Druckluftschäumenanlagen benötigen zusätzlich zu den Elementen von Sprühflut-, bzw. Wasserebelanlagen einen Kompressor zur Druckluftherzeugung, einen Schaumtank und ein Schaummodul zur Druckluftschäumenherzeugung (s. Bild 5). Alternativ zum Kompressor können auch Druckluftflaschen (Stickstoff) für die Druckluftversorgung verwendet werden. Durch das im Vergleich zu reinem Wasser große Schaumvolumen (infolge der eingeschlossenen Luft) werden (insbesondere im Vergleich zu Wasserebelanlagen) größere Rohrdurchmesser erforderlich.

Der Löschschaum wird im Schaummodul durch Vermengung von Wasser, Schaummittel und Druckluft erzeugt und anschließend über Trockenleitungen zu den jeweiligen Auswurfvorrichtungen transportiert.

Für Druckluftschäumen gibt es verschiedene Auswurfvorrichtungen (vgl. Bild 5). Für automatische Druckluftschäumen-BBA in Tunneln sind nur Schaumrotoren oder Flachstrahldüsen relevant. Zusätzlich können im Tunnel Wandhydranten mit Handleitungen zur direkten Brandbekämpfung (Verwendung durch Feuerwehr) angeordnet werden. Löschmonitore können ferngesteuert bedient und zum Aufbringen von Druckluftschäumen über große Distanzen (z. B. Hubschrauberflugplatz) verwendet werden. Aus örtlichen Gegebenheiten und Kosten-Wirksamkeitsgründen sind diese für den Tunnel irrelevant.

3.4.2 Elemente automatischer BBA

Nachfolgend werden die charakteristischen Elemente unterschiedlicher Typen von BBA aufgelistet. Die Darstellung entspricht einer üblichen Standardkonfiguration derartiger Anlagen, die aus Literaturangaben bzw. den durchgeführten Expertenbefragungen abgeleitet wurden. Automatische BBA für Straßentunnel setzen sich demnach aus folgenden Komponenten zusammen:

- Energieversorgung,
- Wasserversorgung,

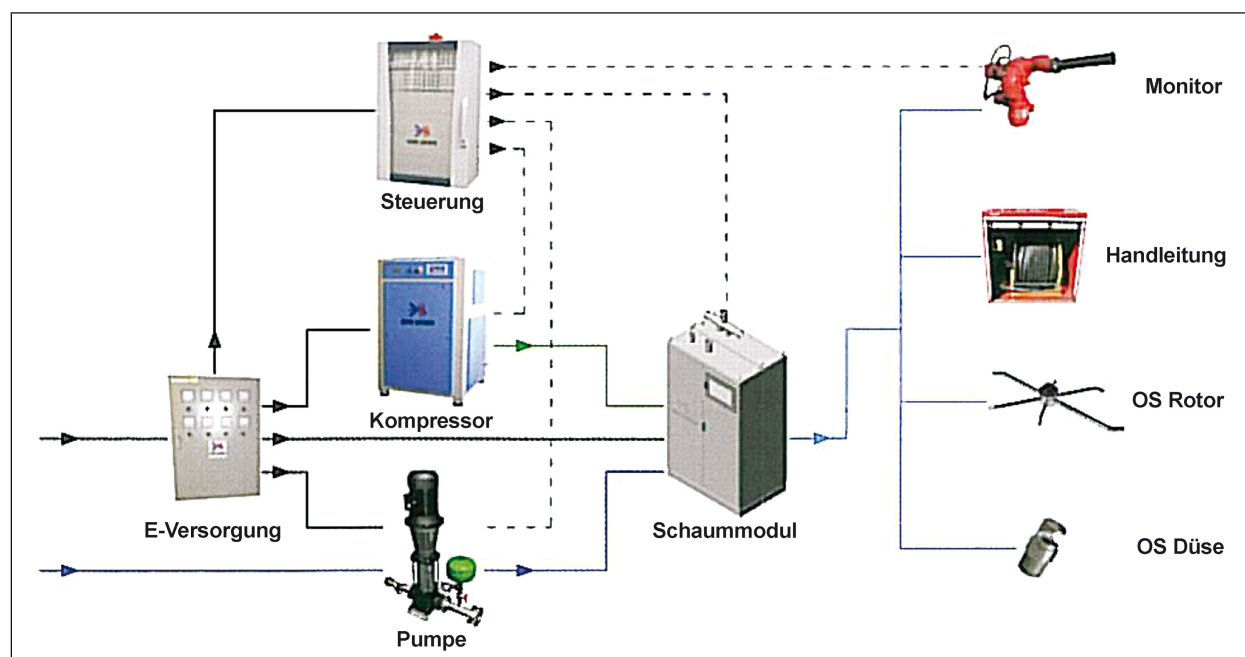


Bild 5: Elemente einer DLS-Anlage [46]

- Pumpstation,
- Pumpenräume,
- Leitungsnetz für Löschmittel,
- Abschnittsventile,
- Ausbringungsvorrichtung,
- Steuerung,
- Entwässerungsanlage,
- Schaumerzeugungsanlage.

In Abhängigkeit lokaler Randbedingungen können einzelne Bauteile entfallen oder zusätzlich erforderlich sein.

Die oben aufgeführten Komponenten werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben, wobei sich die Angaben wesentlich auf den Planungsleitfaden stützen, der im Rahmen des Projektes SOLIT2 erarbeitet wurde [63].

Energieversorgung

Die Auslegung der Energieversorgung einer BBA muss den relevanten Normen und Richtlinien entsprechen. Es ist dabei zu beachten, dass sie eine Verfügbarkeit aufweist, die mindestens den Anforderungen für eine Lüftungsanlage entspricht [27]. Sollten diese Anforderungen durch die Stromversorgung der Tunnelanlage nicht ausreichend erfüllt werden können, dann sind Dieselgeneratoren oder andere geeignete Energieversorgungen einzusetzen.

Wasserversorgung

Für den vorgesehenen Betrieb einer BBA muss stets genügend Wasser in ausreichender Qualität (Gefrierschutz, keine kritische Verschmutzung etc.) zur Verfügung stehen. Die Wasserverfügbarkeit muss darauf ausgelegt sein, dass alle gleichzeitig aktivierten Abschnitte einer BBA mit genügend Wasser versorgt werden können. Dabei besteht die Möglichkeit, die erforderliche Wasserversorgung entweder über einen direkten Anschluss am öffentlichen Wasserleitungsnetz oder in Form einer Bevorratung mittels tunnelspezifischer Wassertanks zu bewerkstelligen.

Diese Wasserbevorratung sollte idealerweise in der Nähe der Pumpen liegen und gegen unbefugten Zutritt und Missbrauch abgesichert werden. Das erforderliche Volumen der Wassertanks ist

vom Wasserbedarf der maximal gleichzeitig aktivierbaren Anlagenabschnitte sowie von der maximalen Betriebsdauer der Anlage abhängig und für den jeweiligen Einzelfall zu dimensionieren. Die erforderliche Betriebsdauer der Anlage hängt von äußeren Einflüssen (z. B. Bebauungssituation über dem Tunnel, Rahmenbedingungen eines Feuerwehreinsatzes etc.) ab und ist im Zuge der Auslegung der Anlage festzulegen. Das Grundprinzip einer Auslegung der Wasserbevorratung einer automatischen BBA ist es, zumindest die Zeit zu überbrücken, die notwendig ist, bis eine wirksame Brandbekämpfung durch die Feuerwehr möglich ist.

Pumpstation

Abgesehen von den Abschnittsventilen sowie bei Schaumsystemen der Schaumerzeugungsanlage sind die Pumpen die einzigen aktiven mechanischen Bestandteile einer BBA. Ihre Aufgabe besteht darin, das zur Verfügung stehende Wasser mit dem vorgesehenen Druck in das Rohrleitungssystem und schließlich in den Tunnelraum zu befördern. Die Auslegung der Pumpen sowie die Wahl der Anzahl hängen vom System der BBA sowie den Gegebenheiten des Tunnelobjekts ab und sind im Einzelfallabhängig festzulegen.

Pumpenräume

Die Pumpstationen sind in geeigneten Pumpenräumen unterzubringen und diese sind gegen unbefugten Zutritt zu sichern. Die Einrichtung geeigneter Räumlichkeiten kann unter Umständen, z. B. bei einem nachträglichen Einbau einer BBA, beträchtliche Aufwendungen erfordern.

Leitungsnetz für Löschmittel

Um Löschmittel gezielt ausbringen zu können, ist ein Tunnel mit einer BBA in Abschnitte eingeteilt, die im Brandfall einzeln mit Löschmittel beaufschlagt werden können. Das dafür erforderliche übergeordnete Leitungssystem besteht einerseits aus einer Hauptleitung, über die die Löschmittelversorgung im gesamten Tunnel erfolgt, sowie andererseits aus den Abschnittsleitungen in den jeweiligen Zonen. Diese dienen einer Verteilung des Löschmittels auf die einzelnen Düsen in den festgelegten Aktivierungsabschnitten der BBA. Bei einer Aktivierung der BBA wird das Löschmittel somit über die Hauptleitung und geöffnete

Abschnittsventile zu den Abschnittsleitungen befördert, die es über die Ausbringungsrichtungen (Sprühköpfe) im Bereich des Brandherds verteilen. Weil im Ereignisfall funktionierende Leitungen entscheidend sind, müssen sie zum Schutz vor Beschädigungen in sicheren Bereichen des Tunnelquerschnittes angebracht werden.

Abschnittsventile

Wie bereits erwähnt, bilden Abschnittsventile die Schnittstelle zwischen der Hauptleitung und den Abschnittsleitungen in den einzelnen Abschnitten eines Tunnels. Sie sind eine wichtige Komponente hinsichtlich der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der gesamten Anlage und erfordern daher besondere Aufmerksamkeit bei der Instandhaltung. Während der regelmäßigen Unterhaltsarbeiten ist darauf zu achten, dass die Ventile nicht durch Verschmutzungen verkrusten und sich zuverlässig öffnen und schließen lassen. Zur Gewährleistung der Verfügbarkeit dieser Komponenten sind deshalb jährliche Funktionstests und visuelle Kontrollen erforderlich.

Ausbringungsrichtung

Die Ausbringungsrichtungen einer BBA sind außerhalb des Verkehrslichtraums an der Tunneldecke oder an den Seitenwänden anzubringen, wobei das Tunnelobjekt im Normalfall über die gesamte Länge in regelmäßigen Abständen

auszurüsten ist. Aufgrund der Tatsache, dass Ausbringungsrichtungen die letzten Bauteile in der gesamten Komponentenreihe sind und damit die Systemgrenze bilden, sind sie anfällig für Verschmutzungen.

Arbeiten Brandbekämpfungsanlagen mit einem Schaumsystem, kommen neben herkömmlichen Vollstrahldüsen verschiedene Auswurfrichtungen zur Anwendung. Aufgrund limitierter Wurfweite bei Schaumsystemen wäre der Installationsaufwand für ein reines Düsensystem in einem Verkehrstunnel wirtschaftlich zu aufwendig [47]. Aus diesem Grund werden in Tunneln vor allem sogenannte Schaumrotoren angewendet. Diese sind üblicherweise aus mehreren Armen unterschiedlicher Länge aufgebaut, welche durch den Impuls beim Austreten des Druckluftschaums in eine Drehbewegung versetzt werden. Der Löschschaum wird dadurch gleichförmig auf dem Brandgut verteilt.

Steuerung

Die Steuerung einer BBA besteht typischerweise aus einer Hauptsteuerung, einem Kommunikationsnetzwerk sowie einer Untersteuerung (s. Bild 6). Für diese Bestandteile sind grundsätzlich die gleichen Anforderungen einzuhalten wie bei Lüftungs- und Entrauchungsanlagen. Dementsprechend muss auch die Erfüllung von bestimmten Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitszielen sichergestellt werden [27].

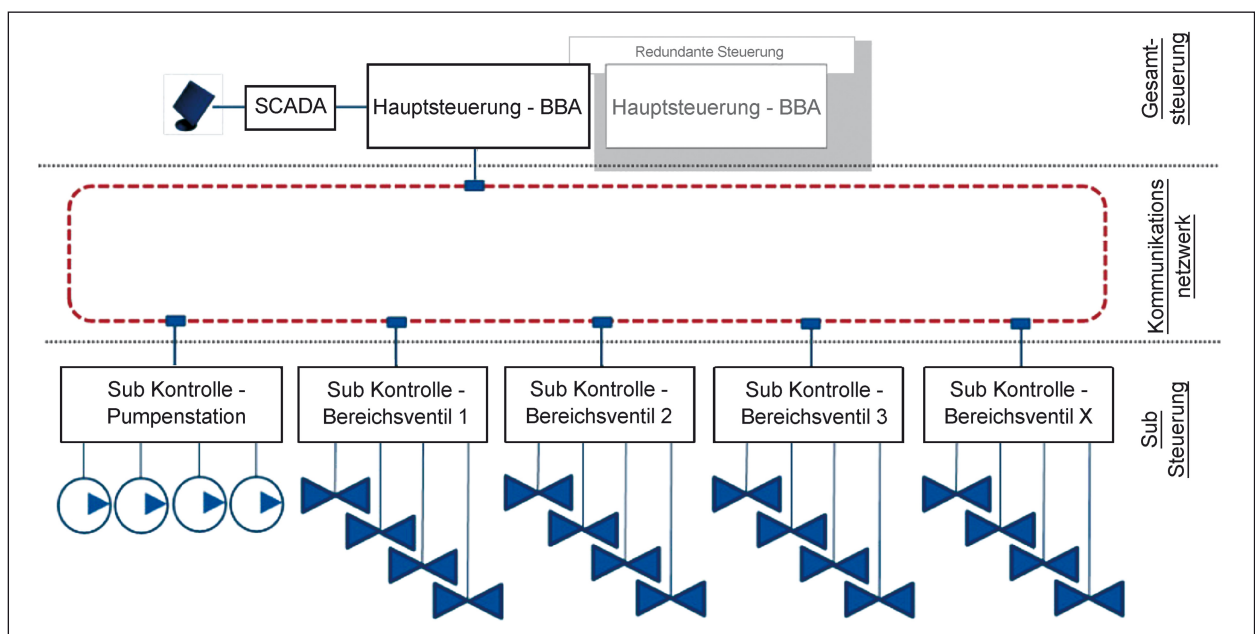


Bild 6: Schematische Darstellung der Steuerung einer BBA an einem Beispiel (eigene Darstellung nach [63])

Entwässerungsanlage

Während einer Aktivierung der BBA wird – je nach Anlagentyp – eine große Menge Löschwasser eventuell mit weiterem Zusatzmittel im Tunnelraum freigesetzt, die abgeleitet und im Auffangbecken gesammelt werden muss. Wenn bei Nachrüstung einer BBA die bereits bestehenden Auffangbecken des Tunnels nicht ausreichen, sind diese gegebenenfalls zu erweitern, damit die gesamte freigesetzte Menge des Löschmittels aufgenommen werden kann. Bei allfällig beigesetzten Additiven zur Brandbekämpfung ist deren fachgerechte Entsorgung zu berücksichtigen. Der Wartungsaufwand ist so auszulegen, dass eine einwandfreie Funktion im Ereignisfall gewährleistet werden kann.

Schaumerzeugungsanlage

Bei einer BBA mit Löschmittel auf Basis von Druckluftschäum ist zusätzlich eine Schaumerzeugungsanlage erforderlich, die den Löschschaum produziert. Dieser Löschschaum wird in einem sogenannten Schaummodul durch die Vermischung von Wasser, Schaummittel in der richtigen Konzentration und Druckluft erzeugt und über Trockenleitungen zu den jeweiligen Ausbringungsvorrichtungen transportiert.

3.5 Wirkungsweise automatischer BBA

3.5.1 Sprühflut- und Wassernebelanlagen

Temperaturreduzierung

Die Hauptlöschwirkung von Sprühflut- als auch Wassernebelanlagen, welche als Löschmittel Wasser verwenden, liegt in der ausgeprägten Temperaturreduzierung. Das in Form von Tropfen unterschiedlicher Größe eingebrachte Wasser entzieht dem Brand durch Erwärmung und Verdampfen Wärme sowohl aus den heißen Verbrennungsgasen als auch von der Oberfläche der Brandlast ab. Die daraus resultierende Kühlung hemmt den Verbrennungsvorgang und unterbricht bei Unterschreiten der Mindestverbrennungstemperatur die Reaktionskette.

Sprühflut- und Wassernebelanlagen unterscheiden sich durch die Verteilung der Tropfengrößen innerhalb des freigesetzten Spektrums (s. Kapitel 3.3). Sprühflutanlagen setzen den größten Anteil des Wassers überwiegend in großen Tropfen frei,

Wassernebelanlagen dagegen produzieren mehrheitlich kleine Tropfendurchmesser. Die jeweiligen Tropfengrößenverteilungen weisen jedoch Überschneidungen auf. Dem entsprechend verläuft auch die Zuordnung der dominierenden Wirkungsanteile großer und kleiner Tropfen zwischen den genannten Anlagentypen fließend.

Die vorwiegende Wirkungsweise hängt maßgeblich von der Wassertropfengröße und damit vom Wasserdruck und der Geometrie der Düsen ab. Bild 7 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Tropfengröße und dem jeweils vorwiegenden Wirkungsort des Wassers.

Große Tropfen, wie an Stelle I in Bild 7 dargestellt, sind charakteristisch für Sprühflutanlagen. Diese Tropfen fallen mehrheitlich durch die Flammen, kühlen hauptsächlich das Brandgut und durchfeuchten noch unverbrannte Brandlasten. Die Verbrennungsgase werden im Verhältnis zur eingesetzten Wassermenge von den großen Tropfen kaum gekühlt, da die Oberfläche großer Tropfen im Verhältnis zur eingesetzten Wassermenge gering ist.

Tropfen geringerer Größe, wie an Stelle II, III und IV dargestellt, fallen langsamer durch die Flammen und heißen Gase und erreichen zu nur einem Teil das Brandgut. Kleine Tropfen besitzen im Verhältnis zur eingesetzten Wassermenge eine große spezifische Oberfläche und somit eine gute Wärmeaustauschfähigkeit, da der Wärmeaustausch an der Tropfenoberfläche stattfindet. Die kleinen Wassertropfen können daher schnell verdampfen, was aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität und der hohen Verdampfungsenthalpie ($E = 2.634 \text{ kJ/l}$)

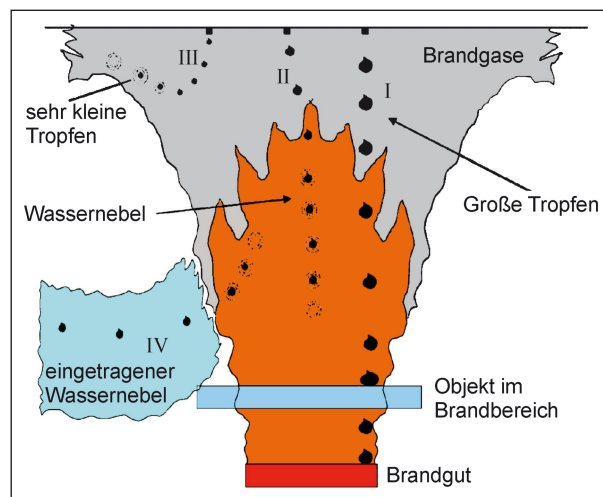


Bild 7: Schematische Darstellung der Wirkungsweise von wasserbasierten BBA [68]

von Wasser mit einer großen Kühlwirkung einhergeht. Kleine Tropfen kühlen und hemmen somit den Verbrennungsvorgang hauptsächlich durch Temperaturaufnahme und Verdunstung in der heißen Gasphase. Die Löschwirkung durch Tropfen dieser geringen Größe ist charakteristisch für Wassernebelanlagen.

Die kühlende Wirkung von Wassernebel und Sprühflutanlagen wurde in diversen Versuchsreihen bei Realbrandversuchen nachgewiesen [29, 30, 67].

Reduzierung der Wärmestrahlung

In der Luft befindliche Wassertropfen haben eine abschirmende Wirkung auf die Ausbreitung von Strahlungswärme. Die in der Luft schwebenden Tröpfchen bilden eine Art Schirm gegen die vom Feuer ausgehende Wärmestrahlung und absorbieren teilweise die Energie in der Umgebung. Da sich die Sinkgeschwindigkeit der Tropfen mit geringerem Tropfendurchmesser reduziert, ist folglich bei Wassernebelanlagen durch die längere Verweildauer die Abschirmwirkung stärker ausgeprägt als bei Sprühflutanlagen mit größeren Tropfen.

Reduzierung der Wärmefreisetzungsrate

Eine wasserbasierte BBA hat aufgrund der zuvor erläuterten Löschwirkungen des eingebrachten Wassers eine begrenzende Wirkung auf die Wärmefreisetzungsrate (HRR) eines Brandes. Die Reduzierung der HRR wird stark von der Art des Brennstoffs (flüssige oder feste Zustandsform) sowie dem Grad der Abdeckung des Brandes beeinflusst [10, 38]. Die verminderte Wärmefreisetzungsrate bewirkt sekundär eine Reduzierung der Brandfolgen hinsichtlich Temperatur, Wärmestrahlung und Rauchgasentwicklung.

Ein weiterer Effekt entsteht durch den aus dem Löschwasser entstehenden Wasserdampf. Durch die im Brandbereich starke Volumenzunahme wird der Sauerstoff verdrängt und die Brandentwicklung dadurch gehemmt.

Verhinderung der Brandausbreitung

Eine geringere Wärmefreisetzung und verminderte Lufttemperatur in Kombination mit einer Reduzierung der Strahlungswärme führt zu einer deutlichen Verringerung des Risikos der Brandausbreitung

durch Feuerübersprung zwischen Fahrzeugen im Tunnel.

Bei Flüssigkeitsbränden (die in der Praxis jedoch sehr selten auftreten) kann die Brandausbreitung durch austretende und je nach örtlichen Umständen am Boden fließende brennbare Flüssigkeiten erfolgen. In der Regel sind in Tunneln jedoch Schlitzrinnen installiert, denen durch die Fahrbahnquerneigung Flüssigkeiten auf kurzem Weg relativ schnell zugeleitet werden, wodurch eine Ausbreitung von Flüssigkeitslachen stark begrenzt wird. Realversuche zur Bestimmung der Ausbreitung von Flüssigkeitslachen bei Fahrzeugleckagen widerlegen ebenfalls die Annahme großflächiger Lachenbildung [23]. Größere Tropfen sind im Allgemeinen weniger geeignet, um Flüssigkeitsbrände einzudämmen: Insbesondere wenn die brennende Flüssigkeit nicht wasserlöslich ist und eine geringere Dichte als Wasser aufweist, bildet sich eine brennende Lache auf dem freigesetzten Löschwasser. Dieser Effekt kann jedoch durch Beigabe von Additiven zum Löschwasser verhindert werden.

Beeinflussung der Sichtverhältnisse

Die Sichtverhältnisse in Tunneln in Ventilationsrichtung hinter dem Brandort können durch die Aktivierung einer BBA verschlechtert werden, weil durch den Impuls des Wassers und die Abkühlung der Rauchgase eine turbulente Strömung entsteht. Der Rauch wird durch die Wassertropfen gewissermaßen in vorher rauchfreie Bereiche bzw. Bereiche mit geringerer Rauchgaskonzentration mitgerissen [10]. Allerdings kann bei größeren Bränden (infolge der Turbulenzen und thermischen Effekte) häufig nicht von einer Rauchgasschichtung ausgegangen werden – auch ohne den Einsatz einer BBA. Die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage bewirkt eine Durchmischung der Luft verbunden mit einer gewissen Angleichung der Temperaturen über die gesamte Höhe des Tunnels (s. Bild 8).

Eine ggf. zuvor vorhandene stabile Rauchgasschichtung wird in den aktivierten Sektionen durch die eintretende Abkühlung bzw. den eingebrachten Impuls gestört. Rauchpartikel werden von den Tropfen abwärts mitgerissen und die Tendenz von Turbulenzen verstärkt.

Die Sichtweite hängt von der Konzentration der Rauchpartikel und der Wassertropfen in der Luft, der Größe der Wassertropfen und den Lichtverhält-

nissen im Tunnel ab. Ein potenzieller Effekt wasserbasierter Löschmittel mit Einfluss auf die Sichtverhältnisse besteht, auch in der Weise, dass

in der Nähe des Brandes entstandener Wasserdampf abluftseitig wieder kondensieren und dadurch Nebel erzeugen kann.

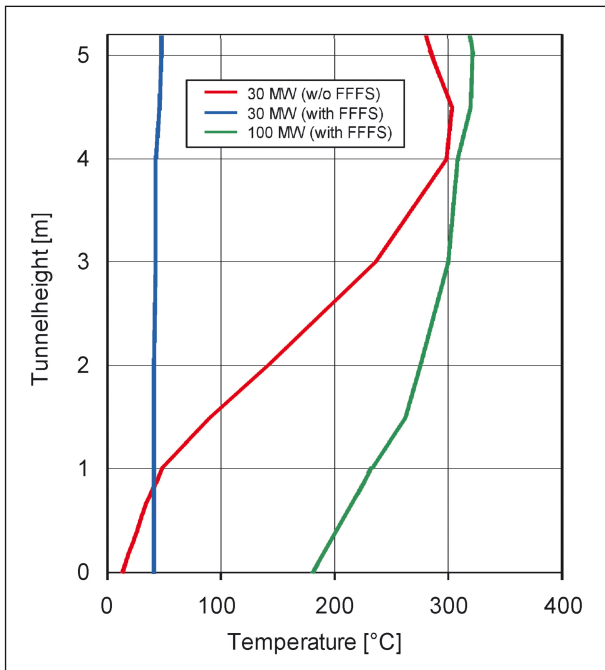


Bild 8: Vertikale Temperaturverteilung über die Tunnelhöhe in einem Querschnitt abstromseitig 45 m hinter dem Brandherd bei 30 MW Flüssigkeitsbrand mit und ohne Aktivierung einer BBA, bzw. 100 MW Flüssigkeitsbrand mit BBA [36]

Beeinflussung der Rauchgaskonzentration

Da die Rauchgaskonzentration von der Wärmefreisetzungsrate abhängt, beruht der Haupteffekt einer wasserbasierten Brandbekämpfungsanlage diesbezüglich auf der Begrenzung, bzw. Eindämmung der Wärmefreisetzungsrate. Der bei der Beeinflussung der Sichtverhältnisse zuvor beschriebene Effekt einer vertikalen Verteilung der Rauchgase nach unten durch den eingebrachten Impuls und die Abkühlung, wirkt sich auch negativ auf die Rauchgaskonzentration im unteren Teil des Tunnelquerschnitts aus. Dieser Effekt wurde im Rahmen der SOLIT2 Versuche auch durch Messungen bestätigt (s. Bild 9).

Daher sind bezüglich der Rauchgaskonzentration durch den Einsatz einer wasserbasierenden BBA sowohl positive als auch negative Effekte zu erwarten.

Der Effekt der Auswaschung von Schadstoffen in der Atmosphäre durch das Löschmittel wäre vorstellbar, es liegen jedoch zu dieser Thematik derzeit keine Messdaten vor.

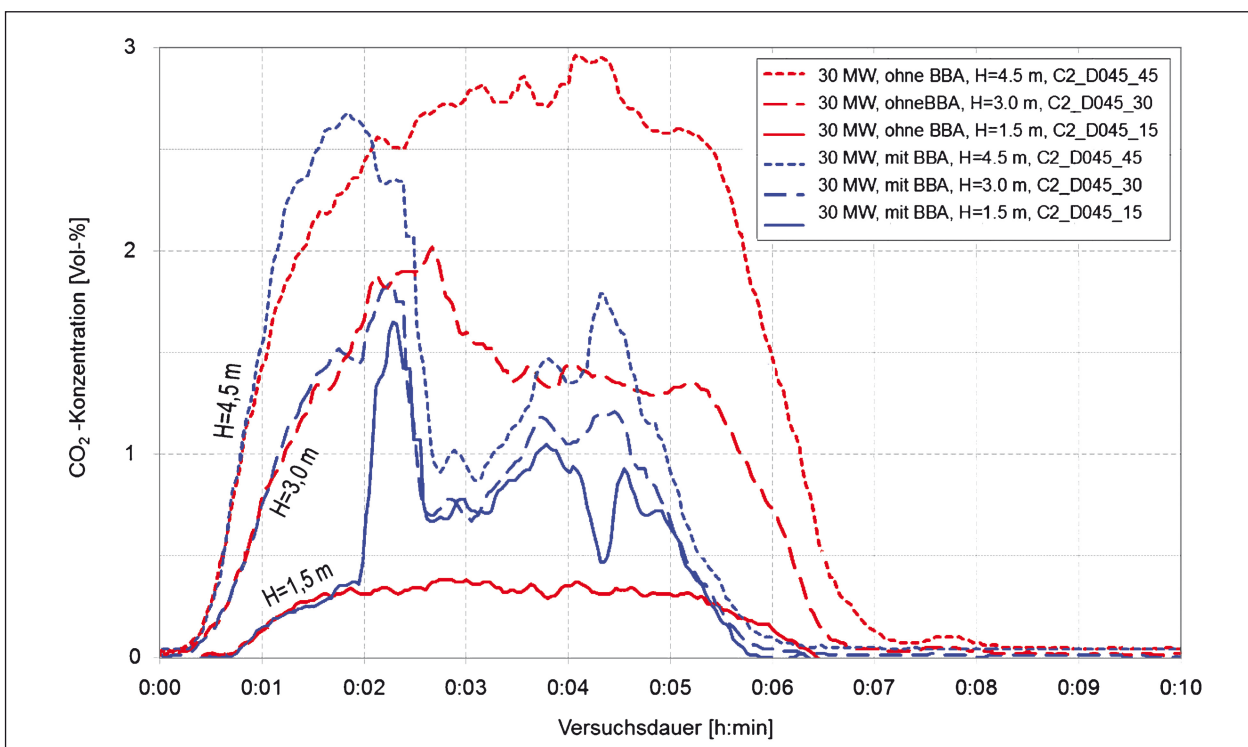


Bild 9: Vertikale Schadstoffverteilung über die Tunnelhöhe in einem Querschnitt abstromseitig 45 m hinter dem Brandherd bei 30 MW Flüssigkeitsbrand mit und ohne Aktivierung einer BBA [36]

3.5.2 Druckluftschäumenanlagen

Reduzierung der Wärmefreisetzungsrates – Heat Release Rate

Die Hauptlöschwirkung von Druckluftschäumen ist auf die erstickende und trennende Wirkung zurückzuführen. Durch eine geschlossene Schaumdecke wird das Brandgut vom Sauerstoff der Umgebungsluft getrennt. Die Trennwirkung unterbricht den Verbrennungsvorgang durch Trennung des Oxidationsmittels Sauerstoff vom Brandgut (s. Kapitel 2.1.1).

Eine geschlossene Schaumdecke verhindert auch die weitere Abgabe brennbarer Gase oder Dämpfe aus der brennenden, bzw. erhitzten Brandlast. In der Folge bewirkt dies eine Reduzierung der Wärmefreisetzungsrates.

Temperaturreduzierung

Schaumlöschanlagen besitzen aus demselben Effekt wie wasserbasierte BBA eine kühlende Wirkung. Aufgrund der im Vergleich zu kleinen Wassertropfen kürzeren Verweildauer des Schaumes im freien Fall wirkt die Temperaturreduzierung von Löschschaum im Wesentlichen auf das Brandgut, welches durch den Druckluftschäumen oberflächlich befeuchtet und gekühlt wird. Dabei besitzt der Löschschaum durch die Beimengung von Schaummittel eine vergrößerte Oberfläche, wodurch ein höheres Wärmeaufnahmevermögen erreicht wird. Dadurch kann die Temperatur des Brandgutes gesenkt werden. Die verringerte Temperatur des Brandgutes reduziert sekundär den Dampfdruck austretender Brandgase. Druckluftschäumen ist daher besser geeignet zur Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden als rein wasserbasierende Systeme. Allerdings spielen Flüssigkeitsbrände bezüglich der Häufigkeit in Straßentunnels eine untergeordnete Rolle (s. Kapitel 2.4.2).

Verhinderung der Brandausbreitung

Eine Reduzierung der Strahlungswärme durch die Deckwirkung des Schaumes auf dem Brandgut führt zu einer Verringerung des Risikos der Brandausbreitung durch Feuerübersprung zwischen Fahrzeugen im Tunnel. Diese resultiert aus der geringen Wärmeleitfähigkeit des Löschschaumes und bewirkt eine Abschirmung von gelöschtem oder noch nicht entzündetem Material gegenüber der Wärmestrahlung des Brandes.

Ein Vorteil des Druckluftschaumes ist, dass dieser auf am Boden fließende, brennbare Flüssigkeiten schwimmt und diese durch den Trenneffekt entweder löscht oder durch den Deckeffekt vor Entzündung schützt. Des Weiteren fließt Schwer- und Mittelschaum teilweise auch unter Fahrzeuge.

Die Haftungseigenschaften des Löschschaumes bewirken ein zeitlich verzögertes Ablaufen vom Brandgut und somit einer verlängerten Wärmeübertragung vom Brandgut auf den Schaum.

Beeinflussung der Sichtverhältnisse

Die Sichtweite hängt von der Brandgröße, der Konzentration der Rauchpartikel, den Lichtverhältnissen im Tunnel, der jeweiligen Auswurfvorrichtung und der Menge des ausgebrachten Schaumes ab.

Die Sichtverhältnisse in Tunnel können durch die Aktivierung einer BBA auf Schaumbasis verschlechtert werden, weil durch den Impuls des Schaumes und die eintretende Abkühlung der Rauchgase eine starke Durchmischung entsteht. Zusätzlich entstehen Verwirbelungen im Bereich der Schaumrotoren.

Videoaufnahmen von Brandversuchen mit Schaumanlagen zeigen akzeptable Sichtverhältnisse von mehr als 20 m.

Beeinflussung der Rauchgaskonzentration

Da die Rauchgaskonzentration von der Wärmefreisetzungsrates abhängt, beruht der Haupteffekt einer schäumbasierten Brandbekämpfungsanlage diesbezüglich auf der Begrenzung, bzw. Eindämmung der Wärmefreisetzungsrates.

Zur direkten Beeinflussung der Rauchgaskonzentration liegen derzeit keine Messungen vor. In den vorliegenden Videoaufzeichnungen ist zu erkennen, dass wie bei den anderen BBA-Typen auch die Rauchsichtung zerstört wird und der Brandrauch vom Tunnelfirst nach unten befördert werden.

Der Effekt der Auswaschung von Schadstoffen in der Atmosphäre durch das Löschmittel wäre vorstellbar, es liegen jedoch zu dieser Thematik derzeit keine Messdaten vor.

3.6 Verbreitung und Anwendung von BBA

Breite Anwendung in Straßentunneln finden automatische BBA derzeit nur außerhalb Europas, in Australien und Japan. Dort existieren derzeit nationale Vorschriften, welche die Installation von BBA grundsätzlich fordern. Hier werden als Komponente der Sicherheitsausrüstung des Tunnels nahezu ausschließlich Sprühflutanlagen vorgesehen.

Ungeachtet der indifferenten Vorschriftenlage besteht sowohl für neue als auch bestehende Tunnel weltweit erkennbar eine Tendenz, bei besonderen Anforderungen zunehmend automatische Brandbekämpfungsanlagen in die Untersuchungen einzu beziehen. Der Einbau oder die Nachrüstung erfolgt dabei in Amerika und Europa immer auf Basis einer Betrachtung im Einzelfall. Ausschlaggebend für die Entscheidung sind dabei objektspezifische Risikofaktoren wie die Konstruktion und die Abmessungen des Tunnels, spezielle Randbedingungen des Tunnelbauwerks, wie z. B. Überbauung oder Unterquerung von Gewässern, die Verkehrsführung, die Verkehrsbelastung, der Gefahrgutanteil, oder die Stauneigung. Laut PIARC-Umfrage [55] erfolgt die Nachrüstung eines Tunnels mit einer BBA vorrangig zum Schutz des Bauwerks und der im Tunnel befindlichen Personen. Weiter werden der Schutz der Tunnelausrüstung und die Freigabe von Gefahrguttransporten im Tunnel als Grund für den Einbau einer BBA angegeben.

Das maßgebliche Schutzziel ist im Fall der öffentlichen Hand als Tunnelbetreiber vorrangig der Personenschutz, d. h. die Gewährleistung der Selbstrettung und ergänzend eine Unterstützung der Fremdrettung und Brandbekämpfung zur Abwendung großer Brandereignisse. Bei privat finanzierten Tunnelprojekten, welche in hohem Maße von Mauteinnahmen abhängig sind, sind häufig wirtschaftliche Betrachtungen (potenzielle Einnahmeausfälle infolge von Brandereignissen) ausschlaggebend. Die positive Wirkung der BBA auf die Selbstrettung wird jedoch immer als Zusatznutzen bewusst angestrebt.

In einigen europäischen Staaten (Frankreich, Spanien, Großbritannien, Österreich) wurden in der Vergangenheit vorwiegend Wassernebelanlagen eingebaut. Von dieser Analyse abweichend wurden jedoch in Schweden mehrere große Straßentunnelprojekte mit Low-Cos-Sprühflutsystemen ausgerüstet. Die bewusst kostengünstig konstruierten

Systeme werden als zusätzliche Sicherheitsausrüstung im Sicherheitskonzept in Tunneln mit hoher Verkehrsbelastung angesehen.

In Deutschland wurde bis dato lediglich ein Pilotprojekt mit einer automatischen Brandbekämpfungsanlage ausgestattet. Im Pörzbergtunnel erfolgte die Wahl eines Druckluftschaumsystems aufgrund erhöhter Anforderungen durch häufige Gefahrguttransporte [70].

Von der PIARC wurde im Zuge der Erarbeitung des aktuellen Berichts zum Einsatz automatischer BBA in Straßentunneln eine weltweite Erhebung über den praktischen Einsatz von BBA durchgeführt und im Anhang zu diesem Bericht dokumentiert. Dieser Anhang wurde seitens der PIARC für das gegenständliche Projekt zur Verfügung gestellt [55].

4 Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitssystemen

4.1 Analyse der Wechselwirkungen – Vorgehen

Straßentunnelsicherheit ist ein komplexes Querschnittsthema, das eine integrale Betrachtung und Herangehensweise erfordert. Die modernen Strategien der Tunnelsicherheit erfordern im Ereignisfall ein enges Zusammenwirken von Verkehrsteilnehmern, Tunnelbetreibern und Rettungsorganisationen. Als Voraussetzung dafür werden für moderne Tunnel ausgefeilte Sicherheitskonzepte entwickelt, die eine auf die individuellen Rahmenbedingungen des jeweiligen Tunnels heruntergebrochene Umsetzung einheitlicher Grundprinzipien sicherstellen sollen und die ein optimal aufeinander abgestimmtes Zusammenwirken von technischer Tunnelausrüstung, deren automatischer oder manueller Steuerung und auf spezifische Ereignisszenarien abgestimmten Organisationskonzepten erfordern. Vor dem Hintergrund der EU-Direktive 2004/54/EC [16] wurden die Grundlagen der Sicherheitskonzepte hierfür in die einschlägigen Richtlinien (insbesondere in die RABT 2006 [18]) integriert und in die Praxis umgesetzt.

Im Zuge dieser Entwicklungen ist in den letzten 10 Jahren insbesondere die Schaffung der notwendigen Voraussetzungen für eine Selbstrettung im Falle eines Tunnelbrandes in den Mittelpunkt der Überlegungen gerückt.

Insofern bedarf der Einsatz eines neuen, innovativen Sicherheitssystems wie dies eine automatische Brandbekämpfungsanlage darstellt, einer sorgfältigen Prüfung, wie diese in die bereits bestehenden Systeme eingefügt werden kann bzw. welche Voraussetzungen für den Einsatz eines derartigen Systems erforderlich sind bzw. wie sich dessen Einsatz auf andere Sicherheitssysteme bzw. das Verhalten der involvierten Personengruppe auswirkt.

Die qualitative Analyse dieser Wechselwirkungen bildet einen wesentlichen Aspekt des gegenständlichen Forschungsvorhabens, da dieses darauf abzielt, sowohl das Potenzial für Kompensationsmöglichkeiten einer Brandbekämpfungsanlage zu identifizieren und zu bewerten als auch deren mögliche negative Effekte zu untersuchen. Für die Bewertung der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen ist das deshalb ein zentrales Thema, weil dies ein System ist, das bereits sehr früh in die Entwicklung eines Brandszenarios eingreift und daher alle weiteren Ereignisabläufe beeinflussen kann (und damit auch die Wirksamkeit der in der Ereigniskette später wirkenden Maßnahmen).

Zur Analyse der Wechselwirkungen wird die Ereigniskette eines Brandereignisses in chronologischer Abfolge auf vier Ebenen analysiert:

- Auf der Ebene der Verkehrsteilnehmer: diese benutzen den Tunnel auf ihrer Fahrt und werden plötzlich mit einem unerwarteten Ereignis konfrontiert, das rasch bedrohlich werden kann und rasche spezifische Reaktionen erfordert, auf die sie nicht vorbereitet sind.
- Auf der Ebene des Tunnelbetreibers (Operator, der Tunnel überwacht und Systeme steuert): dieser wird mit einem seltenen Ereignis konfrontiert, auf das er jedoch (generell) vorbereitet ist und das bestimmte Reaktionen erfordert, die in Notfallplänen vorgegeben sind, sowie für deren Durchführung er durch die Sicherheitssysteme aktiv unterstützt wird. Die Aufgaben des Operators lassen sich grob in Überwachungs- und Informationsaufgaben und Aufgaben zum Ereignismanagement gliedern.
- Auf der Ebene des Tunnelbauwerks und dessen Ausrüstung.
- Auf der Ebene der Rettungsorganisation: auch für die Rettungsorganisation ist ein Tunnel Einsatz nicht alltäglich; diese sind jedoch ebenfalls vorbereitet und kennen die Tunnelanlage und ihre Besonderheiten.

Anhand dieser Grobstruktur wird in der Folgeschrittweise analysiert: (1) An welchem Punkt eine automatische Brandbekämpfungsanlage eingreift bzw. eingreifen soll, (2) welche Voraussetzungen dafür erforderlich sind, bzw. (3) wie der weitere Ablauf des Ereignisses durch die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage beeinflusst wird.

Im ersten Schritt wird nicht zwischen verschiedenen Typen einer Brandbekämpfungsanlage unterschieden. Erst in einem zweiten Schritt wird auf Unterschiede zwischen einzelnen Brandbekämpfungsanlagentypen eingegangen.

Der nachfolgende erste Arbeitsschritt ist eine reine Analyse der relevanten Wirkungen mit einer groben Klassifizierung in günstige und ungünstige Effekte bzw. Voraussetzungen. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dies ein erster Analyseschritt und keine endgültige Bewertung dargestellt, da hierfür auch die Interaktion mit den Wirkungen des Brandes zu berücksichtigen ist.

4.2 Beschreibung der Effekte

4.2.1 Ebene Verkehrsteilnehmer

Eine automatische Brandbekämpfungsanlage interagiert in mehrfacher Weise mit den Verkehrsteilnehmern, die einen Tunnel benutzen, in dem ein Brandereignis stattfindet.

- Verkehrsablauf – Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage
Die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage führt zu unerwarteten, plötzlichen und massiven Sichtbehinderungen im Tunnel. Wird eine Brandbekämpfungsanlage während des laufenden Verkehrs aktiviert, kann dies unkontrollierte Fahrmanöver und Unfälle zur Folge haben. Bezüglich des Verkehrsablaufs ergeben sich daher Empfehlungen für die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage. Problematisch können in diesem Zusammenhang nicht beabsichtigte Aktivierungen der Brandbekämpfungsanlage sein (Fehl- oder Täuschungsauslösungen).
- Aktive Brandbekämpfungsanlage – Verhalten von Personen im Wirkungsbereich der Brandbekämpfungsanlage
Die Nebenwirkungen einer Brandbekämpfungsanlage (Sichteinschränkung, Nässe, Kälte) beeinflussen das Verhalten von Personen, die sich mit ihrem Fahrzeug im Wirkungsbereich einer aktivierten Brandbekämpfungsanlage befinden.

Dies kann verschiedene Verhaltensweisen betreffen, wie z. B. den Versuch der Weiterfahrt trotz massiver Sichtbehinderung, die Bereitschaft, das Fahrzeug zu verlassen bzw. das Verhalten im Tunnel und der Fortbewegungsmöglichkeiten (eingeschränkte Orientierung) von Personen, die das Fahrzeug verlassen haben und die sich zu Fuß im Tunnel fortbewegen. Aus unterschiedlichen Verhaltensweisen können sich zusätzliche Konflikte ergeben (z. B. Selbstrettung zu Fuß und versuchte Weiterfahrt).

- **Aktive Brandbekämpfungsanlage – Einwirkung von Temperatur und Schadstoffen infolge des Brandes auf Personen im Tunnel**
Durch Hemmung der Brandentwicklung und positive Beeinflussung der Ausbreitung gesundheitsgefährdender Wirkungen eines Brandes im Tunnel wird die Gefährdung von Personen im Einflussbereich eines Brandes wesentlich vermindert und die mögliche Aufenthaltsdauer in dieser Zone verlängert.

Hinsichtlich der Sichtbehinderungen im Tunnel ergeben sich bzgl. der auftretenden Wechselwirkungen Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagentypen:

Bei Sprühflutanlagen ist die Sichtbeeinträchtigung durch die Aktivierung der Anlage selbst etwas geringer als bei Wassernebelanlagen. Bei Aktivierung der Anlage im verrauchten Bereich ist allerdings wegen der bei allen Anlagentypen zu erwartenden Verwirbelung des Brandrauchs kein anlagenspezifischer Unterschied zu erwarten.

Über die Auswirkungen einer Aktivierung der Druckluftschamanlage auf die Sichtverhältnisse in Fahrzeugen liegen derzeit keine Angaben vor.

4.2.2 Ebene Betreiber/Operator

- **Verkehrsüberwachung/Verkehrsanhaltung – Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage**
Aufgrund der Wechselwirkungen mit den Verkehrsteilnehmern ist es angeraten, den Verkehr vor Aktivierung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage möglichst anzuhalten. Daraus ergibt sich die Frage, auf welche Weise der Operator die verkehrlichen Gegebenheiten im Ereignisfall rasch überprüfen kann und welche Voraussetzungen diesbezüglich gegeben sein müssen, bevor eine Brandbekämpfungsanlage tatsächlich aktiviert wird.

- **Aktive Brandbekämpfungsanlage – Information Verkehrsteilnehmer**
Eine aktive Brandbekämpfungsanlage verursacht einen Schallpegel, der die Wahrnehmung von Lautsprecherdurchsagen im Tunnel je nach BBA-Typ stark beeinträchtigt. Eine Übermittlung von Informationen über Verkehrsfunk an noch im Fahrzeug befindliche Personen wird wegen der schalldämmenden Wirkung des Fahrzeuges weniger stark beeinträchtigt.
- **Aktive Brandbekämpfungsanlage – Überwachung der Ereignisentwicklung**
Im Wirkungsbereich einer Brandbekämpfungsanlage ist aufgrund der starken Sichteinschränkung eine Überwachung der Ereignisentwicklung mittels Videokameras nur sehr eingeschränkt möglich (von außerhalb). Dies trifft jedoch in gleicher Weise auf alle verrauchten Tunnelabschnitte zu – auch wenn keine BBA aktiviert wird, unter Umständen werden die nicht mehr mit Video übersehbaren Bereiche durch Aktivierung der BBA ausgeweitet.
- **Ereignisdetektion – Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage**
Die Detektion eines Brandes und die Auslösung eines Brandalarms ist die Grundvoraussetzung für die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage; eine rasche Detektion eines Brandes ist essentiell, da eine rasche Aktivierung wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Anlage hat; auf welche Weise die Ereignisdetektion erfolgt, ist von untergeordneter Bedeutung.
- **Aktive Brandbekämpfungsanlage – Lüftung**
Eine aktive Brandbekämpfungsanlage hat keinen unmittelbaren Einfluss auf die Funktion der Lüftung; tendenziell unterstützt eine Brandbekämpfungsanlage durch Hemmung der Brandentwicklung (geringere Rauchgasmengen, Temperaturen und Schadstoffkonzentrationen) auch die Wirkung der Rauchmanagementmaßnahmen, kann sie aber nicht ersetzen; tendenziell ungünstig wirkt sich die Aktivierung einer Brandbekämpfungsanlage auf die vertikale Verteilung der Rauchgase im Tunnelquerschnitt aus.

4.2.3 Ebene Tunnelbauwerk – Tunnelausrüstung

- **Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage – Wasserversorgung**
Eine Brandbekämpfungsanlage verursacht einen hohen Wasserverbrauch und erfordert

daher eine entsprechende Wasserversorgung bzw. Wasserbevorratung.

- Aktive Brandbekämpfungsanlage – Zustand Tunnelbauwerk
Durch Hemmung der Brandentwicklung und starke Reduktion der Temperatureinwirkung auf das Bauwerk kann eine Brandbekämpfungsanlage Bauwerksschäden infolge eines Brandes effizient verringern.
- Aktive Brandbekämpfungsanlage – Funktionsfähigkeit Tunnelausrüstung
Durch Hemmung der Brandentwicklung und massive Reduktion der Temperatureinwirkung auf die Tunnelausrüstung kann eine Brandbekämpfungsanlage die Funktionsfähigkeit der Tunnelausrüstung bei einem Brand weitgehend sicherstellen und Schäden an der Tunnelausrüstung verringern bzw. lokal stark eingrenzen.
- Aktive Brandbekämpfungsanlage – Entwässerungsanlage
Eine aktivierte Brandbekämpfungsanlage beaufschlagt in hohem Ausmaß die Entwässerungsanlagen und erfordert eine entsprechende Auslegung auf die geplante Einsatzzeit.

4.2.4 Ebene Rettungsorganisationen

- Vorhandensein einer Brandbekämpfungsanlage – Einsatzkonzept der Feuerwehr
Das Vorhandensein einer Brandbekämpfungsanlage erleichtert den Feuerwehreinsatz erheblich und hat Auswirkungen auf das Einsatzkonzept und unter Umständen auch auf die personellen, ausrüstungstechnischen und logistischen Anforderungen.
- Betrieb einer Brandbekämpfungsanlage – Retten und Löschen
Die Wirkung einer Brandbekämpfungsanlage erleichtert wesentlich den Rettungs- bzw. Löscheinsatz. Durch die Reduktion der Wärmewirkungen kann der Brandherd leichter erreicht werden und der Brand wesentlich rascher und effizienter gelöscht werden. Die potenzielle Gefährdung der Einsatzkräfte selbst wird verringert und ihr Bewegungsspielraum wesentlich erweitert, dadurch wird der Einsatz beschleunigt und wirkungsvoller (effizientere Personenrettung).

5 Betrieb von automatischen BBA

Ein wesentlicher Aspekt des Forschungsvorhabens beschäftigt sich mit dem Thema des Betriebs von automatischen Brandbekämpfungsanlagen – insbesondere mit der Frage deren Aktivierung. Diese Fragestellung ist aus zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten zu diskutieren:

- aus dem Blickwinkel der Brandbekämpfung und der Wirkungsweise der BBA selbst,
- aus dem Blickwinkel der Wechselwirkungen mit dem Verhalten der Tunnelnutzer, der Tätigkeit des Operators und mit anderen Sicherheitssystemen.

Im Zuge der durchgeführten Betreiber- und Herstellerbefragungen wurde diese Thematik ebenfalls intensiv diskutiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Schlussfolgerungen ein.

5.1 Aktivierung einer BBA aus dem Blickwinkel der Brandbekämpfung

Bei unterschiedlichen Forschungsvorhaben wurden Brandversuche durchgeführt und verschiedene Aktivierungszeitpunkte von BBA untersucht, um die Wirkungsweise von BBA in verschiedenen Phasen der Brandentwicklung zu testen.

Die getesteten automatischen BBA sind sehr effizient bei der Eindämmung der Brandentwicklung und der Verhinderung einer Brandausbreitung. Eine frühzeitige Aktivierung kann daher sicherstellen, dass der Brand klein gehalten werden kann und die Wärmefreisetzungsraten niedrig bleibt [63, 11].

Zu Verdeutlichung dieses Effekts ist in den folgenden Grafiken der zeitliche Verlauf der HRR mit unterschiedlichen Aktivierungszeitpunkten dargestellt. Bild 10 zeigt Ergebnisse aus Großbrandversuchen mit einer Wassernebelanlage und Bild 11 die mit einer Sprühflutanlage.

- Automatische BBA sind sehr effizient, die Wärmewirkungen voll entwickelter Brände zu reduzieren. Einer BBA ist es möglich, den Brandherd und Rauchgase zu kühlen und die Wärmestrahlung abzuschirmen.

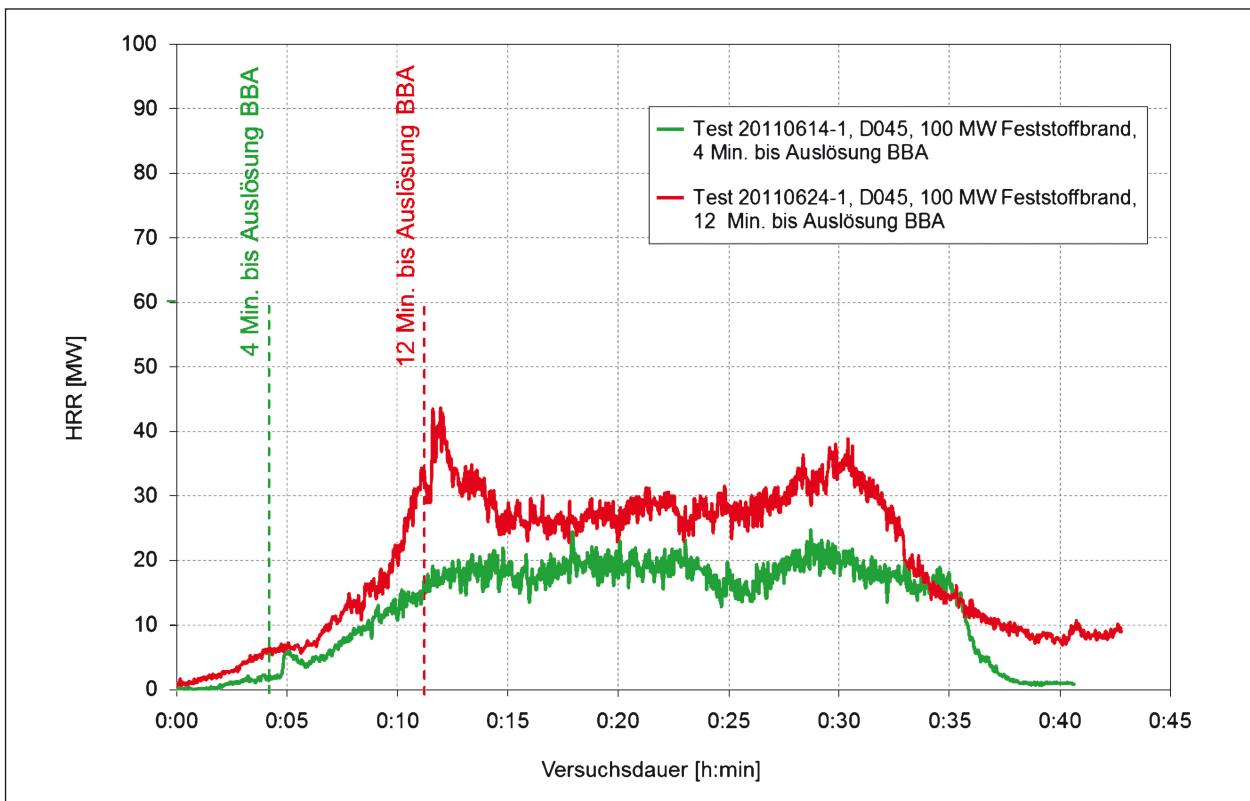


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der HRR bei einem 100 MW Feststoffbrand mit Auslösung der BBA nach 4 Minuten bzw. 12 Minuten [63]

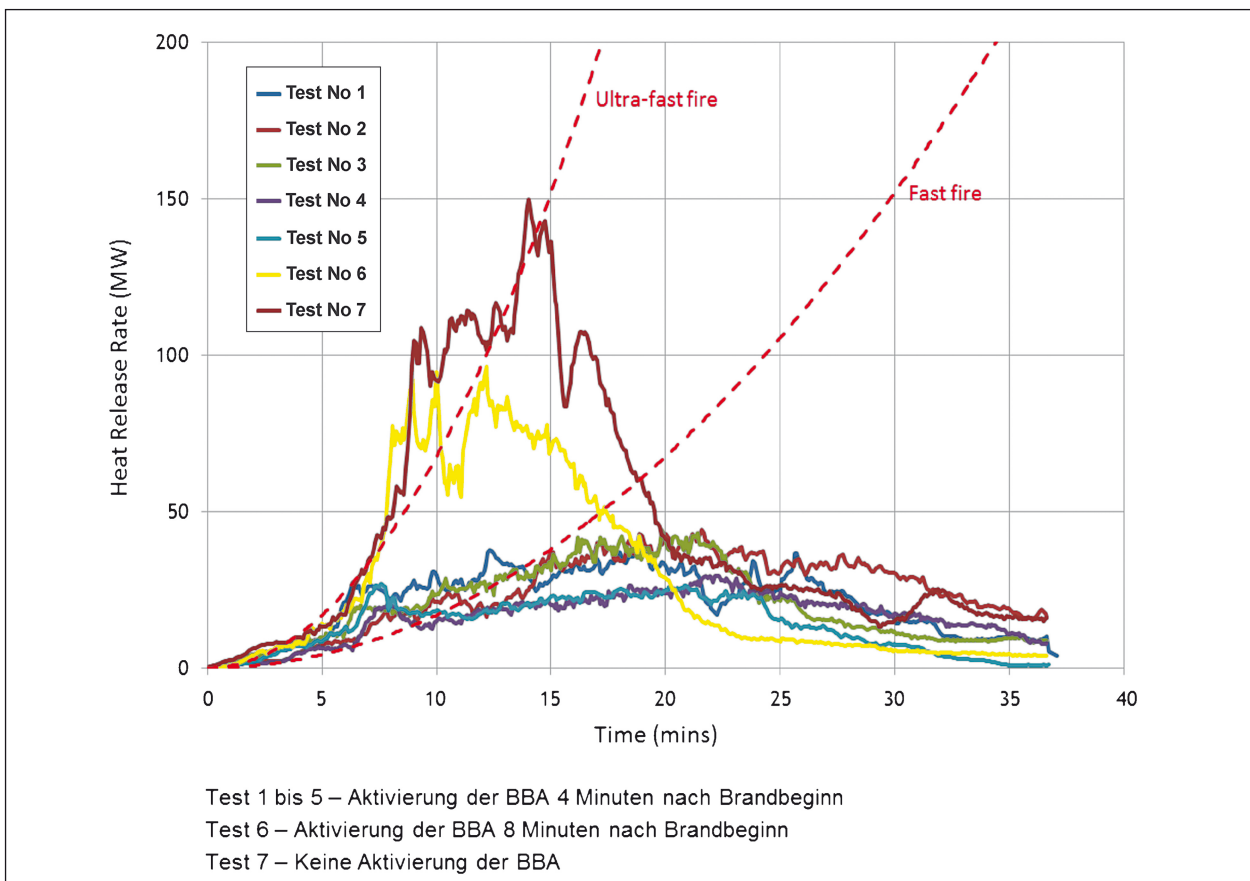


Bild 11: Zeitlicher Verlauf der HRR bei einem Lkw-Brand mit Auslösung der BBA nach 4 Minuten bzw. 8 Minuten [11]

- Automatische BBA sind weniger effizient, die Wärmefreisetzungsraten voll entwickelter Brände zu reduzieren. Dies gelingt nur in begrenztem Ausmaß und die Hersteller weisen darauf hin, dass dies nicht in allen Fällen sichergestellt werden kann. Dies hat zur Folge, dass bei einem großen Brand auch nach der Aktivierung einer automatischen BBA auf der Abstromseite mit atmosphärischen Bedingungen zu rechnen ist, die ein Überleben nicht sicherstellen können.
- Dazu kommt, dass die Aktivierung der BBA zu einer beschleunigten vertikalen Durchmischung der Luft im Tunnelquerschnitt führt und dadurch heiße Rauchgase aus dem Firstbereich rasch auf Fluchtwegniveau befördert werden (s. Kapitel 3.5.1). In der Zone in Strömungsrichtung hinter dem Brandherd wirkt dieser Effekt den grundsätzlich positiven Wirkungen einer BBA entgegen.

Aus all diesen Überlegungen lässt sich eindeutig schließen, dass eine möglichst frühzeitige Aktivierung der BBA anzustreben ist um einen Brand bereits in der Entstehungsphase einzudämmen und zu kontrollieren. Diese Schlussfolgerung gilt für alle BBA-Typen in gleichem Maße.

5.2 Aktivierung aus dem Blickwinkel der Wechselwirkungen

Aus der Analyse der Wechselwirkungen einer BBA mit dem Verhalten der Tunnelnutzer, der Tätigkeit des Operators und mit anderen Sicherheitssystemen lassen sich folgende Aspekte zusammenfassen:

- Die Versuche und Tests belegen, dass die Aktivierung einer Anlage in der betroffenen Zone schlagartig zu einer relativ ausgeprägten Sichteinschränkung führen, sodass ein sicherer Verkehrsablauf nicht mehr gewährleistet ist. Diesbezüglich bestehen gewisse Unterschiede zwischen den verschiedenen Anlagentypen: bei Sprühflutanlagen ist die Sichtbeeinträchtigung tendenziell etwas weniger stark. Allerdings ist hinzuzufügen, dass diese Beeinträchtigung zunächst nur die Aktivierungszone (später auch den Abstrombereich) und die sich zum Aktivierungszeitpunkt in dieser Zone befindlichen Fahrzeuge betrifft. Auf diesen Bereich zufahrende Fahrzeuge können das Sichthindernis erkennen und entsprechend anhalten.

- Bezüglich der Wechselwirkungen einer BBA mit dem Fluchtverhalten der betroffenen Personen bestehen große Unsicherheiten. Aus diesem Grund ist dieser Aspekt auch einer der Untersuchungsschwerpunkte des gegenständlichen Forschungsvorhabens. Wenn es jedoch gelingt, die Anlage so frühzeitig zu aktivieren, dass die Wärme- und Rauchfreisetzung so niedrig ist, dass auch im Abstrombereich die Gesundheitsgefährdung ausreichend reduziert wird, verliert dieser Aspekt an Bedeutung.
- Für den Operator ist von maßgeblicher Bedeutung, welche Entscheidungen und Handlungen er aktiv setzen muss, bzw. welche automatisch ablaufen und kein aktives Eingreifen seitens des Operators erfordern. Wenn er aktiv eingreifen muss bzw. kann, ist wesentlich, welche Informationen er für seine Entscheidungen benötigt und wie diese zeitgerecht und in der erforderlichen Form zur Verfügung gestellt werden können. Aus dem Blickwinkel des Operators ist daher der Ablauf einer Aktivierung wesentlich wichtiger als der Zeitpunkt der Aktivierung.
- Die Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitssystemen sind für den Zeitpunkt und Ablauf einer Aktivierung einer BBA von untergeordneter Bedeutung.

Resümierend ist festzustellen, dass aus dem Blickwinkel der Wechselwirkungen mit den Tunnelnutzern bestimmte Voraussetzungen für eine Aktivierung der Anlage gegeben sein müssen. Gemäß dem Grundsatz, dass durch eine Sicherheitsmaßnahme keine zusätzlichen Gefährdungen ausgelöst werden sollen, die den Schaden eines Ereignisses vergrößern können, wäre das Anhalten des Verkehrs im Tunnel als eine Voraussetzung für eine Aktivierung der Anlage zu definieren. Diese Anforderung macht es erforderlich, dass der

- Operator auch bei automatischen Aktivierungsprozessen eine Eingriffsmöglichkeit haben muss, falls er erkennt, dass der Verkehr noch nicht zum Stillstand gekommen ist,
- Operator über entsprechende (visuelle) Informationen über die Situation im Ereignisbereich verfügen muss.

Generell setzt dies voraus, dass der Tunnel überwacht sein muss bzw. hat zur Folge, dass eine automatische Aktivierung in einem nicht überwachten Tunnel problematisch sein kann.

5.3 Prozedere zur Aktivierung einer BBA

Aus diesen Überlegungen kristallisiert sich die nachfolgend skizzierte Vorgehensweise für die Aktivierung einer BBA als zweckmäßig heraus. Diese deckt sich im Wesentlichen mit der bei den derzeit installierten Anlagen praktizierten Vorgehensweise [27], wobei im Einzelfall immer die spezifischen Rahmenbedingungen des betrachteten Tunnels zu berücksichtigen sind.

- Grundvoraussetzung einer Aktivierung ist die Auslösung eines Brandalarms. Dieser kann, abhängig von der Ausrüstung des jeweiligen Tunnels, auf unterschiedliche Weise erfolgen (automatisch mittels Brandmeldekabel, visuell durch den Operator über Video – nach Detektion eines Initialereignisses, durch Sichttrübesensoren, manuell mittels Brandmelder in einer Notrufnische, etc.).
- Eine weitere Auslösevoraussetzung ist die eindeutige Lokalisierung des Ereignisortes. Dies ist wiederum abhängig von der Art der Auslösung des Brandalarms (z. B. bei manueller Auslösung durch einen Tunnelnutzer nicht gewährleistet).
- Mit Auslösung eines Brandalarms wird die BBA hochgefahren, aber noch nicht aktiviert. Der Operator hat nun die Möglichkeit, mit den ihm zur Verfügung stehenden Mitteln (Video) sich ein genaueres Bild über die Situation zu verschaffen. Je nach Situation kann er den laufenden Prozess stoppen oder sofort die Anlage auslösen. Wenn er bis Ablauf einer vorgegebenen Zeitspanne (meist 60 bis 90 s) keine aktiven Handlungen setzt, wird die Anlage automatisch aktiviert. Wenn er die Anlage in dieser Zeitspanne stoppt (z. B. weil es sich um ein Bagatelereignis handelt oder weil der Verkehr noch nicht zum Stillstand gekommen ist), kann er zu einem späteren Zeitpunkt die Anlage sofort wieder aktivieren, falls dies erforderlich ist. Weiter kann der Operator auch kurzfristig auf andere Abschnitte umschalten, falls sich der Ereignisort verlagert (fahrendes brennendes Fahrzeug) oder falsch detektiert wurde.

Mit diesem Prozedere hat der Operator alle Möglichkeiten, in den Ablauf einzugreifen, wenn er dies für notwendig hält. Umgekehrt hat er die Gewissheit, dass die Anlage nach einer bestimmten Zeit automatisch auslöst, auch wenn er sie selbst nicht aktiviert (z. B. weil er mit anderen Maßnahmen

bereits überlastet ist). Laut Auskunft von Betreibern wird diese Regelung von den Operatoren in der Praxis positiv gesehen.

Mit einer derartigen Regelung wird sowohl der Notwendigkeit einer (möglichst) raschen Aktivierung als auch der Forderung nach Sicherstellung des Anhaltens des Verkehrs vor Aktivierung Rechnung getragen. Bei den in Straßentunneln häufiger auftretenden Brandszenarien (Feststoffbrände mit bestimmter Entwicklungszeit, siehe dazu Kapitel 2.4.2) ist dieses Vorgehen adäquat. Falls eine sehr rasche Brandentwicklung (z. B. bei Folgenbränden nach Unfällen, bei Freisetzung brennbarer Flüssigkeiten) eintritt, kann der Operator manuell sofort aktivieren, sobald er dies erkennt.

Dieses Auslöseprozedere nimmt primär Rücksicht auf die definierten Schutzziele (s. Kapitel 3.3). Bei einer Verknüpfung des Auslösezeitpunktes mit dem Abschluss der Selbstrettung muss gegebenenfalls mit großen zeitlichen Verzögerungen gerechnet werden, wodurch dann die Wirksamkeit der Anlage stark eingeschränkt sein kann. Auf Basis der durchgeführten Analyse ist es in aller Regel besser die Anlage frühzeitig (vor Abschluss der Selbstrettung) auszulösen und dadurch den Brand möglichst klein zu halten.

5.4 Aktivierungsabschnitte

Die Lokalisierung des Brandes erfolgt in der Regel durch lineare Wärmemelder (Brandmeldekabel) an der Tunneldecke. Diese gewährleisten Genauigkeiten von 4 bis 10 m. Zum Teil werden Brände jedoch bereits vor Ansprechen des Brandmeldekabels mit anderen Überwachungseinrichtungen entdeckt, beispielsweise mittels Videoüberwachung (Detektion eines im Tunnel stehen gebliebenen Fahrzeuges mit Rauchentwicklung) oder durch Ansprechen von Sichttrübesensoren. In diesen Fällen ist die Identifizierung des genauen Ereignisortes schwieriger bzw. mit größeren Unsicherheiten bzw. Unschärfen behaftet.

Unschärfen in der Lokalisierung können durch die Aktivierung von mehreren Abschnitten abgedeckt werden. Die Abschnittslängen und die Anzahl der Aktivierten Abschnitte variieren je nach Betreiber und Hersteller. Tabelle 4 zeigt eine Auswahl von Tunneln mit deren Aktivierungsabschnitten.

Bei den meisten Tunneln werden drei Abschnitte aktiviert, wobei hier der Abschnitt, in dem der

Tunnel	Anzahl Abschnitte	Länge je Abschnitt
Swalmen, Roertunnel	3	25 m
Tyne	3	30 m
Pörzberg	2	25 m
Klara	3	40 m
Norra Länken	1	75 m
Stockholm Bypass	2	50 m
Mona Lisa	3	40 m

Tab. 4: Aktivierungsabschnitt bei Tunnelbeispielen

Brandalarm auftritt und die beiden benachbarten Abschnitte ausgelöst werden. Zusätzlich besteht für die Operatoren (und bei manchen Anlagen lokal auch für die Feuerwehr) die Möglichkeit, die aktivierten Abschnitte kurzfristig umzuschalten.

5.5 Wiederinbetriebnahme einer BBA nach Aktivierung

Übliche Tätigkeiten zur Wiederinbetriebnahme der BBA beinhalten das Befüllen der Vorräte (Löschmittel, Treibstoffe), einen Funktionscheck der Anlage, das Entleeren der Auffangbecken und etwaige Reparaturen von Düsen oder Leitungen im direkten Brandbereich.

Bei schaubasierten BBA müssen zusätzlich die Leitungen mit Druckluft ausgeblasen und der Tunnel vom Löschaum gereinigt werden.

Grundsätzlich hängt der Zeitbedarf für die Wiederinbetriebnahme einer BBA von der Größe des Brandereignisses ab. Jedoch wird die Zeitdauer für die Wiederinbetriebnahme einer BBA im Vergleich zur Reparatur nach einem Brandereignis ohne BBA als sehr gering angesehen [27, 45].

6 Modellierte Tunneltypen

6.1 Festlegung der Basis-konfiguration der modellierten Tunneltypen

Als Tunneltypen werden ein Gegenverkehrs- und ein Richtungsverkehrstunnel mit jeweils 1.200 m Länge herangezogen (s. Tabelle 5). Gemäß RABT [18] ist für Tunnel mit einer Länge von 1.200 m die Lüftungsart im Brandfall nicht eindeutig definiert.

	Tunneltyp 1	Tunneltyp 2
Verkehrsart	Gegenverkehr	Richtungsverkehr
Länge	1.200 m	
Notausgangsabstand	300 m	
Längsneigung	3,0 %	
Lüftungssystem	Rauchabsaugung/Längslüftung	
Verkehrsaufkommen	20.000 Fzg/24h	70.000 Fzg/24h
Schwerverkehrsanteil	15 %	
Verkehrsganglinie	Ganglinie gem. Forschungsprojekt „Verfahren zur Bestimmung Lüftungsart“	
Stautunden	30 h	30 h/500 h
Lüftungsauslegung	30 MW	100 MW
Brandszenarien	5/30/100 MW	

Tab. 5: Basiskonfiguration der gewählten Tunneltypen

Für Tunnel dieser Länge ist die Verwendung einer mechanischen Längslüftung bzw. einer Rauchabsaugung mittels Risikoanalyse zu überprüfen. Des Weiteren bietet die Wahl gleicher Länge für Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunnel den Vorteil, in einer Variantenuntersuchung mit vertretbarem Bearbeitungsaufwand eine größere Bandbreite von Parametern, wie unterschiedlichen Notausgangsabständen, unterschiedlichen Lüftungsarten, mit unterschiedlichen Bemessungsbrandleistung zu untersuchen.

Neben der Verkehrsart unterschieden sich die beiden modellierten Tunneltypen beim Verkehrsaufkommen, bei den Stautunden im Tunnel und bei der Lüftungsauslegung. In Tabelle 5 sind die jeweiligen Parameter der beiden Tunneltypen aufgelistet.

Die beiden Tunneltypen sind Neubautunnel, die in bergmännischer Bauweise mit einem Gewölbequerschnitt hergestellt wurden. Als Lüftungssystem ist im Tunnel eine Rauchabsaugung mit Zwischendecke installiert (s. Bild 12).

Als Tunnelquerschnitt wird der RQ 10,5T gem. RABT zugrunde gelegt. Für Tunnel mit Längslüftung wird der gleiche Tunnelausbruchquerschnitt zugrunde gelegt, jedoch ohne Zwischendecke (entsprechende Optimierungsmöglichkeiten werden vernachlässigt).

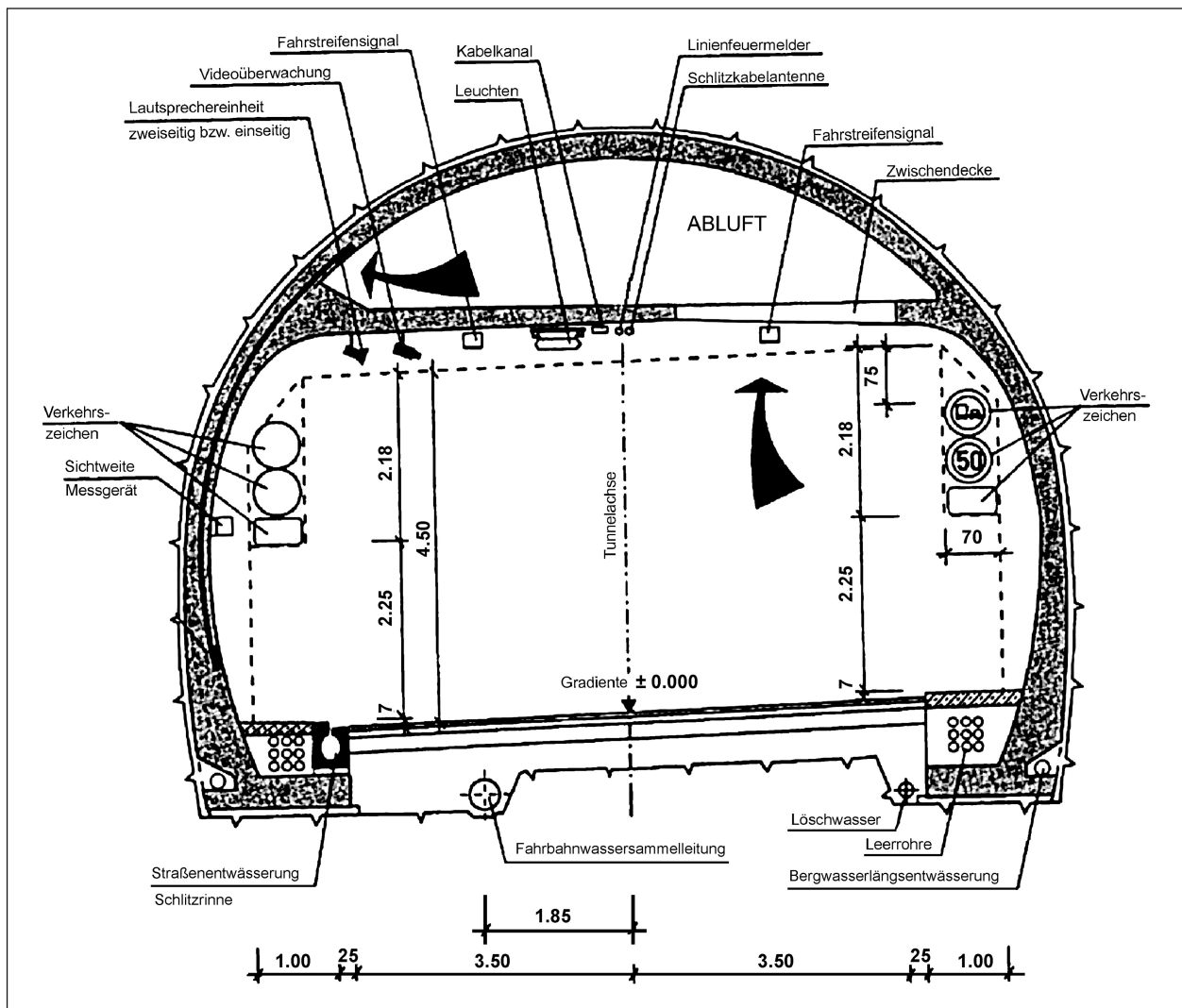


Bild 12: Basisregelquerschnitt RQ 10,5T für die gewählten Tunneltypen (modifiziert mit Rauchabsaugung)

6.2 Variationen von maßgebenden Tunnelparametern

Um mögliche Kompensationsmaßnahmen bei dem Einsatz von BBA bewerten zu können, werden Untervarianten zu den beiden Tunneltypen mit folgenden Variationen untersucht:

- Notausgangsabstand: 200/300/400 m,
- Lüftungssystem: Rauchabsaugung/mechanische Längslüftung,
- Bemessungsbrandleistung 100/30 MW.

Die modellierten Tunneltypen und deren Untervarianten werden im Zuge der risikobasierten Wirkungsbeurteilung mit und ohne Aktivierung der BBA untersucht.

6.2.1 Gegenverkehrstunnel

Für den Tunneltyp 1 im Gegenverkehrsbetrieb werden die in Tabelle 6 dargestellten Parametervariationen untersucht. Im Vergleich zum Grundtyp weisen die 4 Varianten abweichende Lüftungssysteme und Notausgangsabstände auf.

6.2.2 Richtungsverkehrstunnel

Bei Richtungsverkehrstunnel wird zusätzlich in die Kategorien Tunnel mit täglich stockendem und Tunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr unterschieden. Wie in Tabelle 5 erwähnt, wird dafür ein Stauanteil im Tunnel von 30, bzw. 500 Stunden pro Jahr angesetzt.

Für den Tunneltyp 2 mit Richtungsverkehrsbetrieb ergeben sich je nach Stauneigung die in Tabelle 8 und Tabelle 7 dargestellten Varianten. Im Vergleich

	Verkehr	Lüftung	Lüftungsauslegung	Notausgangsabstand
Tunneltyp 1a	Gegenverkehr	Rauchabsaugung	30 MW	300 m
T1a-Variante 1	Gegenverkehr	Rauchabsaugung	30 MW	400 m
Tunneltyp 1b	Gegenverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	300 m
T1b-Variante 1	Gegenverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	200 m
T1b-Variante 2	Gegenverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	400 m

Tab. 6: Varianten für Gegenverkehrstunnel

	Verkehr	Lüftung	Lüftungsauslegung	Notausgangsabstand
Tunneltyp 2a	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	100 MW	300 m
T2a-Variante 1	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	300 m
T2a-Variante 2	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	400 m

Tab. 7: Varianten für Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr

	Verkehr	Lüftung	Lüftungsauslegung	Notausgangsabstand
Tunneltyp 2b	Richtungsverkehr	Rauchabsaugung	100 MW	300 m
T2b-Variante 1	Richtungsverkehr	Rauchabsaugung	100 MW	400 m
T2b-Variante 2	Richtungsverkehr	Rauchabsaugung	30 MW	300 m
T2b-Variante 3	Richtungsverkehr	Rauchabsaugung	30 MW	400 m
Tunneltyp 2c	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	100 MW	300 m
T2c-Variante 1	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	300 m
T2c-Variante 2	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	200 m
T2c-Variante 3	Richtungsverkehr	Mech. Längslüftung	30 MW	400 m

Tab. 8: Varianten für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr

zum Grundtyp weisen die Varianten neben Abweichungen beim Lüftungssystem und Notausgangsabstand zusätzlich eine Reduktion der Bemessungsbrandgröße auf.

6.3 Konfiguration der BBA

6.3.1 Allgemeine Annahmen für die Anlagenkonfiguration

Für jeden Tunneltyp wurde nach einheitlichen Kriterien eine Auslegung einer Brandbekämpfungsanlage durchgeführt. Für die Anlagenkonfiguration werden folgende Grundannahmen getroffen, die für alle drei BBA-Typen gelten:

- Energieversorgung

Pumpen verwenden Elektroantrieb, da diese aus sicherheitstechnischer Sicht zuverlässiger sind, da das Startrisiko von Dieselmotoren entfällt. Es muss jedoch eine relative hohe zusätz-

liche Leistung installiert werden, die bei der Auslegung der E-Technikanlage berücksichtigt werden muss.

- Wirkfläche der BBA

Auf der Grundlage der durchgeführten Erhebungen (s. Kapitel 5.4) wird die Löschbereichslänge für den modellierten Tunneltyp mit 25 m definiert. Die Breite des Löschbereiches entspricht den in Tabelle 5 dargestellten Tunnelquerschnitt RQ 10,5T von 9,5 m. Die dadurch definierte Wirkfläche dient als Berechnungsgrundlage für die benötigte Wassermenge.

- Betriebsdauer der BBA

Neben der Wirkfläche ist die Betriebsdauer ein weiteres wichtiges Kriterium für die benötigte Wassermenge. Basierend auf den Ergebnissen der weltweit durchgeführten Erhebungen der PIARC [55] ist ein Großteil der Anlagen auf eine Betriebsdauer von 60 Minuten ausgelegt, was

daher auch für den modellierten Tunneltyp zugrunde gelegt wird. Löschwasser und Löschschaumvorräte müssen mindestens für diesen Zeitraum zur Verfügung gestellt werden.

- Wasserversorgung

Die Löschwasserversorgung erfolgt über einen ausreichend dimensionierten Wassertank. In der Regel ist kein sicherer Wasseranschluss aus dem Ortswassernetz gegeben. Das Löschwasser verfügt über Trinkwasserqualität und muss nicht zusätzlich gefiltert werden.

- Auslösezeitpunkt

Da die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, dass eine möglichst frühzeitige Aktivierung wesentlichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Anlage hat, wurde für den Vergleich angenommen, dass bei allen Anlagentypen eine ähnliche Aktivierungszeit erreicht werden kann. Die Anlagen wurden daher alle derart dimensioniert, dass ein Austritt des Löschmittels an der Düse ca. 60 Sekunden nach Brandalarm möglich ist. Bei Sprühflut- und Wassernebelanlagen ist diese Anforderung leicht zu erfüllen, da die Hauptleitungen stets mit Löschwasser gefüllt sind. Da die Druckluftschäumenanlage eine Trockenleitung verwendet, wurde, um die definierte Aktivierungszeit von 60 Sekunden gewährleisten zu können, eine zusätzliche DLS-Erzeugungsanlage in Tunnelmitte vorgesehen [45]. Dies hat natürlich Auswirkungen auf die Kosten der Anlage.

6.3.2 Konfiguration der einzelnen BBA-Typen

Im Folgenden werden für jeden BBA-Typ die konfigurierten Anlagen anhand von Skizzen dargestellt. Dabei ist es wichtig, explizit darauf hinzuweisen, dass nicht Zweck der Anlagenkonfiguration war, eine BBA für einen bestimmten Tunnel auf ein bestimmtes Ereignis auszulegen. Vielmehr sollten vergleichende Betrachtungen unter Heranziehung üblicher Kennwerte von BBA und Korrelation mit vorhandenen Versuchsergebnissen durchgeführt werden. Aus Vergleichszwecken wurde für jeden der drei BBA-Typen eine Konzeptionierung der Anlage durchgeführt. Die Dimensionierung der Bestandteile und die Definition von Parametern (z. B. Applikationsrate) basiert auf im Rahmen der Interviews erhaltenen Herstellerangaben und auf für diese Anlagen üblichen Standardwerten.

Bild 13 bis Bild 15 zeigen die BBA-Modeltunnel mit den jeweiligen anlagentechnischen Komponenten. Diese Skizzen beziehen sich auf den Tunneltyp 1 (mit Gegenverkehrsbetrieb). Für den Tunneltyp 2 (mit Richtungsverkehrsbetrieb) sind anlagentechnisch das Leitungsnetz und die Anzahl der Düsen für die zweite Tunnelröhre zu verdoppeln. Der Pumpenraum (inkl. Pumpen und Steuerung), der Wassertank und das Entwässerungsbecken sind nur einmalig zu installieren.

Die Berechnung des Wassertankvolumens basiert auf den Werten der Applikationsrate [67], der Betriebsdauer und der Wirkfläche der BBA. Gemäß CEA 4001 [9] wurde zusätzlich eine Reserve von 10 % berücksichtigt. Dadurch ergibt sich für die Sprühflut- und Wassernebelanlage jeweils dieselbe Kubatur für die Wasserver- und entsorgungsanlage. Bei der DLS-Anlage ist durch die Volumenvergrößerung des Löschmittels durch Verschäumung ein wesentlich größeres Entwässerungsbecken erforderlich. Nach Angaben eines Herstellers löst sich ca. die Hälfte des Löschschaumes im Tunnel auf und es erreicht nur ca. 50 % des ursprünglich aufgebrauchten Löschschaumes das Entwässerungsbecken [45]. Aus diesem Grund wurde die Kubatur dieses Beckens entsprechend angepasst.

Der Flächenbedarf der einzelnen Räumlichkeiten für Anlagen (wie z. B. Pumpen, Steuerung, etc.) ist jeweils in Quadratmeter angegeben und ebenfalls die benötigte Leistung der darin befindlichen Elektrogeräte in Kilowatt angegeben.

Anlagenkonfiguration für die Wassernebelanlage

In Bild 13 ist der Tunneltyp 1 für die Wassernebelanlage dargestellt.

Anlagenkonfiguration der Sprühflutanlage

In Bild 14 ist der Tunneltyp 1 mit Sprühflutanlage dargestellt, welche prinzipiell ähnlich wie die Wassernebelanlage konfiguriert ist. Im Vergleich weisen die beiden Anlagentypen neben der Kubatur des Wassertanks und Entwässerungsbeckens Unterschiede hinsichtlich der erforderlichen Leistung der Wasserpumpe, der Applikationsrate der Düsen und der Dimensionierung des Leitungsnetzes auf.

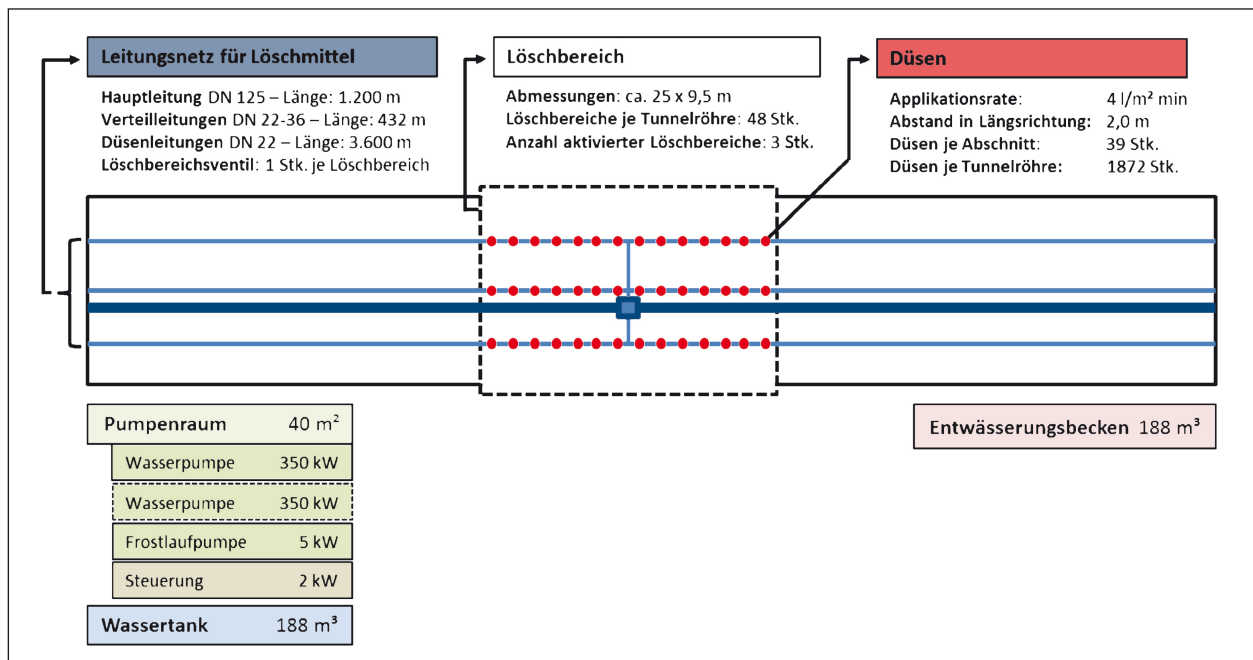


Bild 13: Tunneltyp 1 mit Konfiguration der Wassernebelanlage

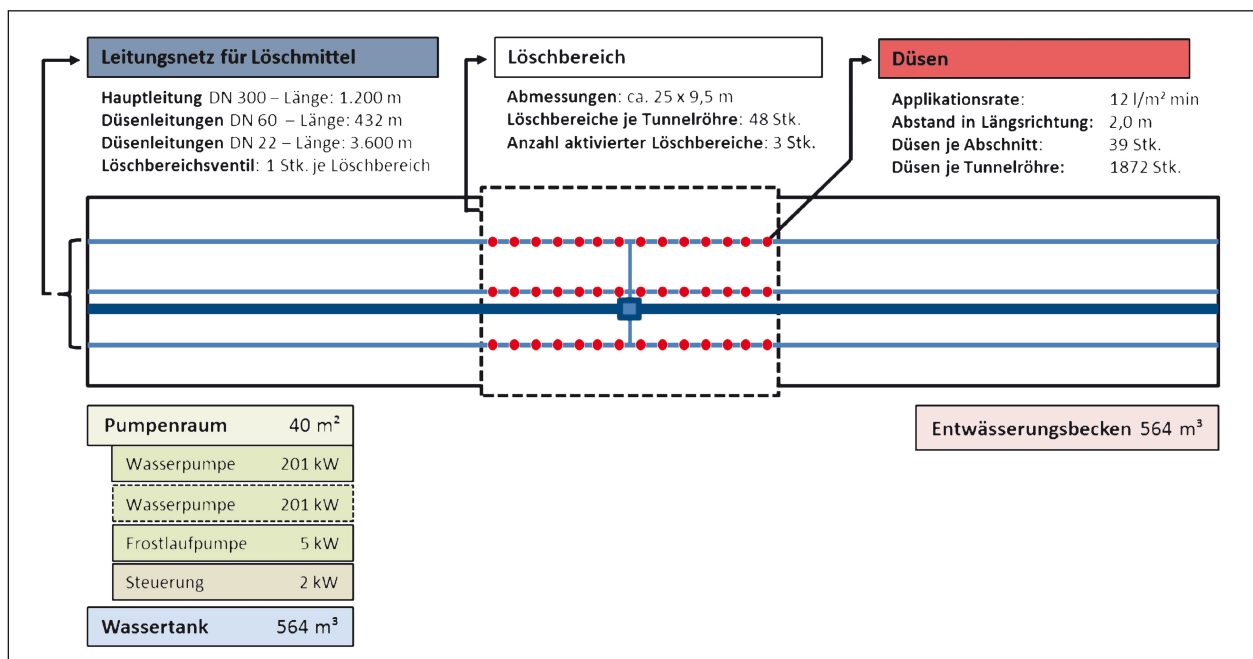


Bild 14: Tunneltyp 1 mit Konfiguration der Sprühflutanlage

Anlagenkonfiguration der Druckluftschaum- anlage

Der Tunneltyp 1 mit DLS-Anlage in Bild 15 weist zusätzlich zu den oben genannten Unterscheidungsmerkmalen weitere Unterschiede gegenüber den anderen Anlagentypen auf, da für die DLS-Erzeugung zusätzliche Anlagen erforderlich sind, welche an beiden Portalen und in Tunnelmitte in einer Nische situiert sind:

- Verschäumungsmodul,
- Druckluftkompressor,
- Schaumtank.

Andererseits werden anstatt von Düsen drei Rotoren je Löschbereich zur Löschmittelaufbringung verwendet. Diese befinden sich auf einer Düsenleitung in Tunnelmitte. Das Bereichsventil zur Trennung zwischen Haupt- und Düsen-

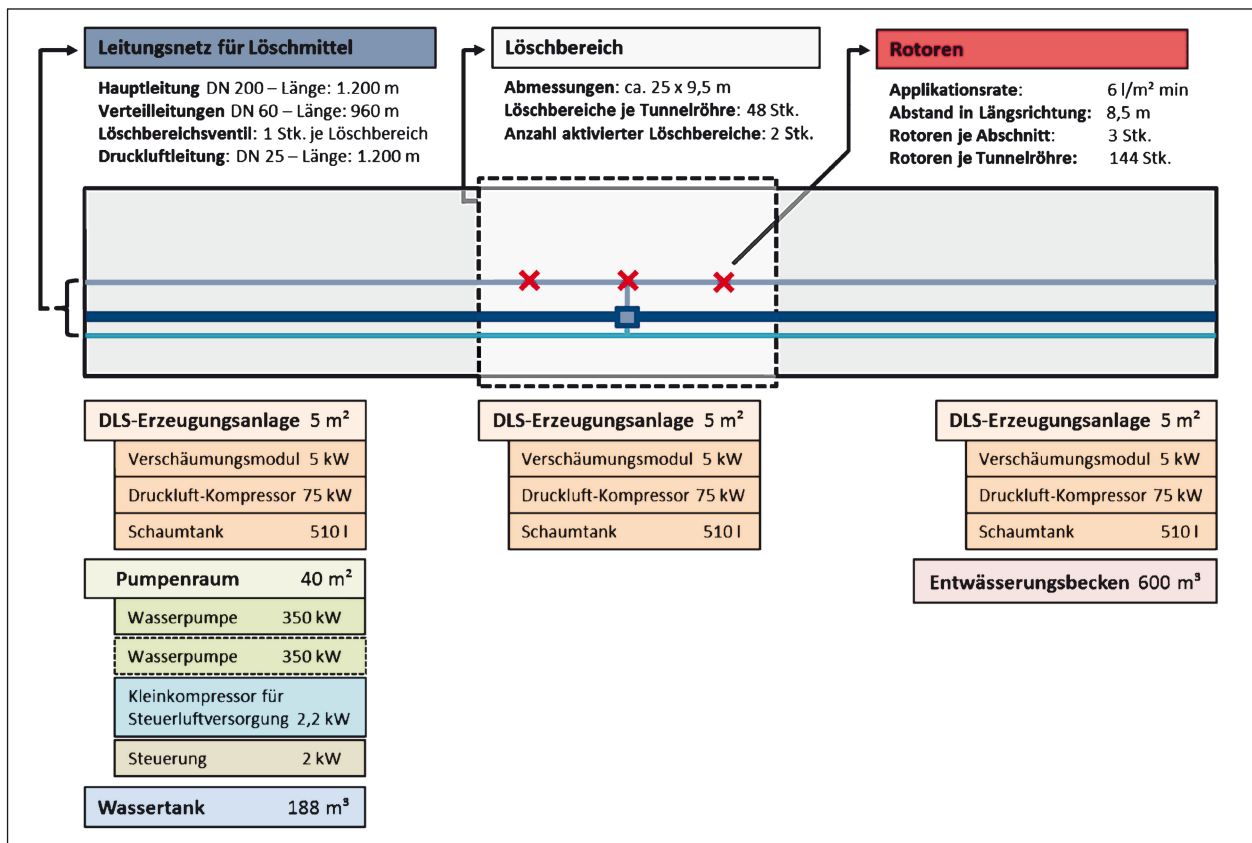


Bild 15: Tunneltyp 1 mit Konfiguration Druckluftschaumanlage

leitung wird pneumatisch gesteuert, wodurch zusätzlich eine Druckluftleitung im gesamten Tunnel und ein Kleinkompressor im Pumpenraum notwendig sind. Ein weiterer Unterschied zur Wassernebel- und Sprühflutanlage ist die Anzahl der aktivierten Löschbereiche mit je 25 m Länge. Anstelle von drei gleichzeitig aktivierten Löschbereichen ist es bei DLS-Anlagen dieser Art üblich, nur zwei Abschnitte gleichzeitig zu aktivieren. In der Praxis wird jeweils der Bereich, in dem der Brandalarm ausgelöst wurde, und ein benachbarter Löschbereich (falls sich das brennende Fahrzeug zwischen zwei Löschbereichen befindet) aktiviert. Gegebenenfalls kann alternierend zwischen den beiden Nachbarabschnitten gewechselt werden und somit dieselbe Länge von 3 x 25 m mit Schaum abgedeckt werden, wie bei den anderen Systemen.

7 Beurteilung der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelbenutzer

7.1 Methodik

Ziel der Studie ist es den Einfluss der Aktivierung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage (BBA) auf das Erleben und Verhalten, insbesondere das Fluchtverhalten, von Tunnelnutzern zu untersuchen. Die virtuelle Realität (VR) stellt hinsichtlich dieser Fragestellung eine effektive Möglichkeit dar, den Einfluss einer Brandbekämpfungsanlage für Tunnelnutzer erlebbar zu machen, ohne sie einer realen Gefahr auszusetzen oder den enormen Aufwand einer Untersuchung in einem realen Tunnel notwendig zu machen.

In virtueller Realität ist es möglich, dass verschiedene Probanden die exakt gleiche Situation erleben. Dadurch kann ein experimentelles Vorgehen realisiert werden und gewährleistet werden, dass sich die untersuchten Gruppen systematisch nur hinsichtlich der manipulierten Variablen unterscheiden. Dies erlaubt gesicherte Rückschlüsse über den Einfluss einer BBA, auch wenn immer die

Limitationen der Simulation (z. B. fehlende Nässe) auf die Ergebnisse zu berücksichtigen sind.

Der Einfluss einer aktivierten BBA auf das Erleben und Verhalten von Tunnelnutzern ist bisher noch nicht empirisch untersucht. Aus der Literatur (siehe auch Kapitel 2.2.) lassen sich aber verschiedene mögliche Einflussmöglichkeiten herleiten. Um gesicherte Aussagen über Erleben und Verhalten zu machen, wird die Erhebung einen breiten Ansatz verfolgen. Das Ziel ist es unterschiedliche Aspekte des Erlebens und Verhaltens zu erfassen, um eine möglichst vollständige Aussage über den Einfluss der BBA treffen zu können.

Als zu untersuchende BBA wurde beispielhaft eine Hochdruckwassernebelanlage gewählt. Diese zeichnet sich durch die Erzeugung von Wasserdampf mit kleinen Wassertropfen aus. Das Ziel bei der Verwendung einer solchen Anlage ist es, die Ausbreitung des Feuers zu verhindern und die Größe des Feuers und damit die Wärme- und Schadstofffreisetzung sowie die Rauchentwicklung zu reduzieren.

Die Untersuchung des Nutzerverhaltens in der virtuellen Realität setzt sich aus einer Übungsphase und zwei Teiluntersuchungen (Fahrscenario und Fluchtscenario) zusammen (siehe Kapitel 7.1.4 und 7.1.5). Die beiden Teilszenarien werden immer in der gleichen zeitlichen Abfolge durchlaufen, sodass alle Probanden zuerst das Fahrscenario und dann das Fluchtscenario absolvieren.

7.1.1 Probanden

Die Gesamtstichprobe besteht aus 50 Probanden, die randomisiert zwei Gruppen zugewiesen wurden: Die eine Hälfte durchlief ein Szenario mit aktivierter BBA und die andere Hälfte dasselbe Szenario, aber ohne Aktivierung der BBA. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 24,8 Jahren. Von den 50 Probanden waren 24 weiblich und 26 männlich. Die beiden Untersuchungsgruppen unterscheiden sich

nicht in der Verteilung des Geschlechts der Probanden ($p = .620$) (Gruppe „mit BBA“ 13 Frauen; Gruppe „ohne BBA“ 11 Frauen), sie unterscheiden sich jedoch im Durchschnittsalter. Die Probanden in der Versuchsgruppe „ohne BBA“ waren im Durchschnitt älter als die Probanden in der Versuchsgruppe „mit BBA“ und hatten dementsprechend durchschnittlich etwas länger einen Führerschein. Auf die Ergebnisse wird kein Einfluss des unterschiedlichen Durchschnittsalters und Führerscheinbesitzes erwartet. In gefahrenen Kilometern pro Jahr und in der Anzahl der Fahrten durch Tunnel unterschieden sich die beiden Versuchsgruppen nicht.

Probanden wurden mithilfe von Internetanzeigen auf regionalen Onlineplattformen rekrutiert. Es wurde darauf geachtet, dass die Probanden in der Vergangenheit an keiner anderen Studie zur Tunnelsicherheit teilgenommen haben.

Die potenziellen Probanden schrieben eine E-Mail an die Versuchsleitung und wurden dann per Telefon kontaktiert. Die Teilnahme an der Untersuchung war freiwillig und die Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung.

7.1.2 Simulationsgerät

PsyCAVE – Simulationssystem

Das verwendete Simulationssystem befindet sich am Lehrstuhl für Psychologie I der Universität Würzburg und versetzt die Probanden in eine virtuelle Welt, sodass ein hohes Maß an Präsenzerleben bei den Probanden hervorgerufen wird. Die Szenarien in VR werden mittels der VR-Simulationssoftware CyberSession gesteuert, welche am psychologischen Institut der Universität Würzburg entwickelt wurde (weitere Informationen unter www.cybersession.info). Das Rendering der Simulation wird von einer Modifikation des auf der Source Engine 2007 basierenden First-Person Spiels Half-Life 2: Deathmatch (Valve, Bellevue, Washington, USA) durchgeführt.

	Mittelwert (Standardabweichung)		Signifikanzwert
	Gruppe „mit BBA“	Gruppe „ohne BBA“	
Alter	23.5 (2.9)	26.1 (9.8)	.015
Führerschein	5.2 (2.5)	8.5 (9.6)	.009
km/a	10.142 (13.140)	9.414 (15.021)	.871
Tunnel/Jahre	24.6 (29.9)	13.9 (41.1)	.481

Tab. 9: Alter, Führerscheinbesitz, gefahrene Kilometer pro Jahr und gefahrenen Tunnel pro Jahr der Probanden, getrennt nach der Versuchsgruppe

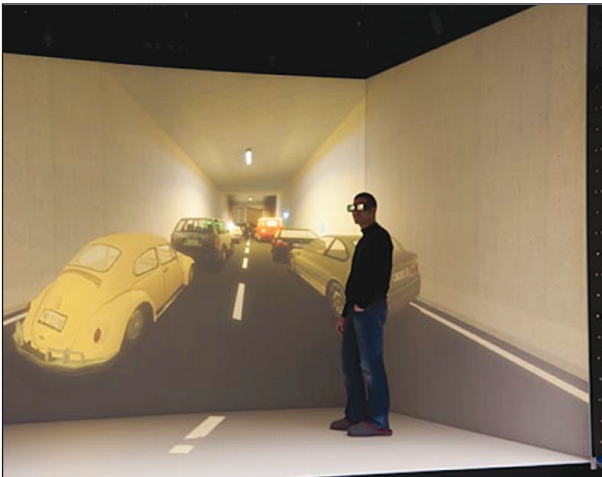


Bild 16: Cave mit Proband bei geöffneter Tür

Die visuelle Darbietung der gerenderten Szene erfolgt auf einer 5-seitigen Cave Automatic Virtual Environment (CAVE, 4 Wände + Boden) mit einer Grundfläche von 4 x 3 Metern und einer Höhe von 3 Metern (s. Bild 2). Die Projektion erfolgt über 6 Projektoren NW-7 (BARCO, Kuurne, Belgien) als Rückprojektion (Ausnahme: Bodenaufprojektion). Die Auflösung der Projektoren beträgt 1920 x 1200 Pixel, wobei den einzelnen Wänden, aufgrund der rechteckigen Grundfläche, weniger oder mehr Pixel zur Verfügung stehen. Pro Projektor sind 2 PCs (Intel Core i72600K; 8 GB RAM; Nvidia Geforce GTX 580; OCZ Vertex2 SSDs) für die Berechnung des Bildes für das jeweils linke und rechte Auge (Stereoskopie) zuständig. Auf einem weiteren PC laufen die Simulationssoftware CyberSession, sowie die Kontrollinstanz der Renderingsoftware. Für die stereoskopische Projektion wird eine passive Interferenzfilter-Brillen (Infitec Premium, Infitec, Ulm, Deutschland) verwendet.

Die Soundkulisse der virtuellen Realität wird über ein am oberen CAVE-Rand montierten 7.1 Surround Soundsystem (CANTON, Weilrod, Deutschland) dargeboten.

Die Bewegungen und die Orientierung der Probanden werden über ein aktives Infrarot-LED-Trackingssystem (PhaseSpace Impulse, PhaseSpace Inc., San Leandro, Kalifornien, USA) mit 4 Kameras erfasst und aufgezeichnet.

Bedienelemente

In der CAVE stehen zwei verschiedene Sets von Bedienelementen zur Verfügung, damit der Proband sich sowohl mit einem Fahrzeug als auch zu Fuß in der virtuellen Welt bewegen kann.



Bild 17: Lenkrad mit Gas- und Bremspedal in der Cave

Während des Fahr Szenarios wird das Fahrzeug mittels Lenkrad mit Gas und Bremspedal (Hersteller: Playseat) in der CAVE gesteuert (s. Bild 17).

Das Lenkrad wurde modifiziert (Lenkradgriff aus echtem Fahrzeug montiert) und um zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten erweitert, um für das Szenario relevante Aktionen durchführen zu können. Man kann den Motor ein- und ausschalten, das Radio ein- und ausschalten, den Warnblinker ein- und ausschalten und die Tür des Fahrzeugs öffnen. Alle diese Interaktionen sind als Buttons, in verschiedenen Farben und mit Beschriftung, auf dem Lenkrad angebracht.

Während des Fluchtszenarios befindet sich der Proband als Fußgänger in der virtuellen Realität und bewegt sich mithilfe eines Spielecontrollers (X-Box 360 Controller, Microsoft), die Richtung der Bewegung wird zusätzlich durch eine Positionserfassung ermittelt. Zusätzlich kann er mithilfe der Buttons des Controllers mit Gegenständen in der virtuellen Welt interagieren.

7.1.3 Übung

Zu Beginn der Untersuchung wird dem Proband die Möglichkeit gegeben, sich mit der virtuellen Realität vertraut zu machen. Dabei werden die verschiedenen Arten der Navigation (Spielecontroller und Lenkrad/Pedale) ausführlich geübt.

Die Übungen zum Umgang mit dem Lenkrad für das Fahr Szenario bestehen aus einer Fahrt auf einer geraden Strecke ohne Tunnel. Während dieser Fahrt wird der Proband gebeten verschiedene Lenkbewegungen auszuführen und sich mit Gas- und Bremspedal vertraut zu machen. Zu



Bild 18: Sicht des Probanden während der Übungsfahrten. Links freie Strecke mit Pylonen zum Kennenlernen des Fahrzeugs, rechts Tunneldurchfahrt ohne Ereignis

diesem Zwecke stehen Pylonen auf der Strecke. Der Proband hat die Aufgabe diese zu umfahren. Zusätzlich werden ihm die verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten erklärt und diese geübt. Die Dauer der Übung wird an die individuellen Bedürfnisse des Probanden angepasst. Erst wenn sich Proband und Versuchsleiter sicher sind, dass der Proband die Steuerung beherrscht, wird die Übung beendet. Zum Abschluss der Übung durchfährt der Proband einmal den verwendeten Testtunnel ohne Zwischenfall.

Um den Umgang mit dem Spielecontroller für das Fluchtszenario zu erlernen, durchläuft jeder Proband ein dafür entwickeltes Labyrinth. In diesem Labyrinth muss der Proband sich in verschiedene Richtungen bewegen und eine Tür öffnen. Durch die Richtungsänderungen und die Interaktion mit der Tür wird sichergestellt, dass der Proband die Steuerung mithilfe des Spielecontrollers beherrscht.

7.1.4 Fahrscenario

Während des Fahrscenario sitzt der Proband auf einem Sitz und befindet sich in der virtuellen Welt in einem Pkw (VW Golf V). Die Navigation in der virtuellen Welt erfolgt über ein Lenkrad mit vier Eingabeknöpfen sowie Gas- und Bremspedal. Das Szenario beinhaltet eine Unfallsituation mit einem brennenden Lkw in einem Gegenverkehrstunnel.

Der Proband startet die Fahrt vor dem Tunnel. Er folgt, während seiner Fahrt durch den Tunnel, einem Fahrzeug, das mit konstanter Geschwindigkeit vor ihm durch den Tunnel fährt. Im Tunnel beträgt das Tempolimit 80 km/h. Kurz vor Tunnelmeter 900 bremst das vorausfahrende Fahrzeug und hält am

Ende eines kurzen Verkehrstaus aufgrund eines Unfalls mit einem brennenden Lkw. Der Proband hat die Aufgabe ebenfalls zu bremsen und hinter dem vorausfahrenden Pkw zum Stehen zu kommen. Von seinem Standpunkt aus sieht der Proband den brennenden Lkw und die Rauchentwicklung sowie drei Fahrzeuge, die sich im Stau zwischen ihm und dem Lkw befinden. Außerdem befindet sich ein Notausgang und diesem gegenüberliegend eine Notrufstation im Blickfeld des Probanden.

Der Proband kommt, aufgrund des Staus, mindestens 30 Meter vom Unfall entfernt zum Stehen. Aufgrund des Brandes des Lkws kommt es zu Rauchentwicklung. Zur Berechnung der Ausbreitung des Rauches wurde ein 30 Megawatt Brand mithilfe der Software „Fire Dynamics Simulator“ simuliert, wobei von einem starken Luftstrom ausgegangen wurde, der zu einer abgeschwächten Rauchausbreitung im Tunnelbereich, indem der Proband sich befindet, führt. Dadurch wurde sichergestellt, dass nicht der gesamte Einflussbereich der BBA schon vor der Aktivierung verrauchte war. Circa 15 Sekunden nachdem der Proband zum Stehen kommt, wird er mittels einer Durchsage zum Verlassen des Tunnels durch den Notausgang aufgefordert (Alarmierung). Die Durchsage wird in regelmäßigen Abständen wiederholt. Zur Untersuchung der Fragestellung werden direkt nach der Durchsage zwei Experimentalbedingungen miteinander verglichen:

- In Gruppe A wird zur Eindämmung des Brandes eine automatische BBA direkt nach Ende der ersten Durchsage aktiviert.
- In Gruppe B breitet sich der Rauch weiter aus.



Bild 19: Sicht des Probanden direkt nach Ende der Durchsage in der Bedingung „mit BBA“ (links) und „ohne BBA“ (rechts)

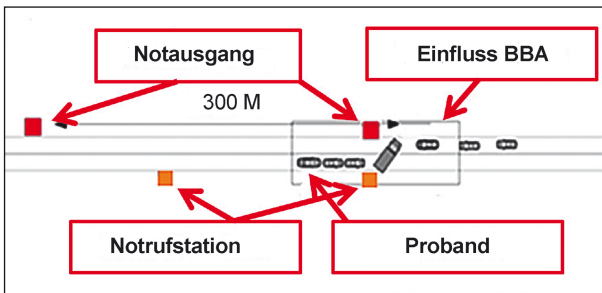


Bild 20: Fahrplanzenario in der Bedingung mit BBA mit Notausgängen und Einflussbereich. Die Skizze ist schematisch und gibt nicht die genauen Maßstäbe wieder

Die beiden Szenarien unterscheiden sich nur hinsichtlich der BBA und ihres Einflusses auf die Umwelt (Sichtverhältnisse, Geräuschkulisse).

Die aktivierte BBA versprüht einen Wassernebel im Bereich des Unfalls, was visuell simuliert wird. Die Ausdehnung der Simulation der BBA beträgt insgesamt 75 Meter. Von diesen 75 Metern befinden sich 50 Meter auf der Seite des Unfalls, auf welcher der Proband sich befindet. Dies bedeutet, dass alle Probanden, die höchstens 50 Meter vom Unfall entfernt anhalten, sich mit ihrem Fahrzeug im Einflussbereich der BBA befinden. Sobald die BBA aktiviert wird unterdrückt sie die Rauchentwicklung des Brandes und es entsteht kein zusätzlicher Rauch.

In beiden Bedingungen haben die Probanden nach der Durchsage 60 Sekunden Zeit das Fahrzeug per Knopfdruck zu verlassen. Sollten sie in dieser Zeitspanne nicht aussteigen so wird der Versuchsdurchgang beendet. Wenn der Proband sich entscheidet das Fahrzeug zu verlassen, so wird ihm mitgeteilt, dass er das Fahrzeug jetzt

verlassen hat, er aber bitte noch auf seinem Stuhl sitzenbleiben soll, bis der Durchgang beendet wird. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Probanden mit demselben Vorwissen aus dem Fahrplanzenario das Fluchtszenario beginnen. Nach einer kurzen Umbauphase, in der der Fahrzeugsitz und die Interaktionselemente für das Fahrplanzenario entfernt werden und die Türen der CAVE hierfür geöffnet wird, (Dauer circa 2 Minuten) schließt direkt das Fluchtszenario an.

7.1.5 Fluchtszenario

Das Szenario entspricht dem Szenario aus Teil A. Der Proband steht allerdings zu Beginn des Untersuchungsteils im Abstand von 30 Metern zum Unfall-Lkw direkt neben seinem Fahrzeug (Situation nach dem Aussteigen). Die Navigation in der virtuellen Welt erfolgt in diesem Versuchsteil mit Hilfe eines Spielekontrollers. Der Proband wird instruiert, dass sich das Fluchtszenario direkt an das Fahrplanzenario anschließt und er beim Start des Szenarios gerade das Fahrzeug verlassen hat.

Dabei ist die Aufteilung in zwei Gruppen dieselbe wie im Fahrplanzenario. Probanden, die im Fahrplanzenario die Aktivierung der BBA erlebt haben, erleben auch das Fluchtszenario mit aktivierter BBA.

- In Gruppe A ist zur Eindämmung des Brandes eine automatische BBA aktiviert. Der Proband befindet sich im Einflussbereich der BBA.
- In Gruppe B breitet sich der Rauch weiter aus.



Bild 21: Sicht im Fluchtszenario in der Bedingung „mit BBA“ (links) und „ohne BBA“ (rechts)



Bild 22: Testprobandin im Fluchtszenario

Die beiden Szenarien unterscheiden sich nur hinsichtlich der BBA und ihres Einflusses auf die Umwelt (Sichtverhältnisse, Geräuschkulisse).

In beiden Gruppen endet der Versuch sobald der Proband den Tunnel durch einen Notausgang verlässt, am Notausgang vorbei in Richtung Portal flieht oder an einer Notrufstation einen Notruf absetzt.

7.1.6 Unabhängige Variable

Sowohl im Fahrscenario, als auch im Fluchtszenario ist die unabhängige Variable die Simulation der Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage. In Gruppe A wird die BBA aktiviert, in der Gruppe B nicht (s. Tabelle 10).

Vergleich zweier Bedingungen	
Gruppe A (25 Probanden): aktivierte Brandbekämpfungsanlage	Gruppe B (25 Probanden): keine aktivierte Brandbekämpfungsanlage

Tab. 10: Aufteilung der Versuchsgruppen

7.1.7 Fluchtverhalten außerhalb der BBA (Zusatzgruppe)

Zusätzlich zu den beiden experimentellen Versuchsgruppen, die in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden, wurde eine weitere Gruppe bestehend aus 10 Probanden getestet. Die Probanden dieser Gruppe erlebten im Tunnel die Aktivierung einer BBA (so wie die Gruppe A), sie befanden sich aber sowohl im Fahrscenario nach dem Anhalten als auch zu Beginn des Fluchtszenario nicht innerhalb des Einflussbereichs der BBA (wie die Probanden der Gruppe A), sondern außerhalb des Wassernebels (Abstand zum Wassernebel ca. 10 Meter). Untersucht werden sollte, wie sich Probanden außerhalb der BBA im Vergleich zu Probanden innerhalb der BBA verhalten, wenn sie mit deren Aktivierung konfrontiert werden.

Die Versuchsgruppen „mit BBA“ und die Zusatzgruppe unterscheiden sich nicht im Alter oder dem Geschlecht („mit BBA“: 13 Frauen von 25 Probanden, „außerhalb BBA“: 4 Frauen von 10 Probanden, $p = .372$). Die Gruppen unterscheiden sich ebenfalls nicht in den gefahrenen Kilometern pro Jahr oder den Jahren seit denen sie einen Führerschein

	Mittelwert (Standardabweichung)		Signifikanzwert
	Gruppe „mit BBA“	Gruppe „ohne BBA“	
Alter	23.5 (2.9)	24.7 (4.5)	.526
Führerschein	5.2 (2.5)	6.6 (3.5)	.403
km/a	10 142 (13 140)	8 617 (15 162)	.877
Tunnel/Jahre	24.6 (29.9)	10.3 (12.3)	.045

Tab. 11: Alter, Führerscheinbesitz, gefahrene Kilometer pro Jahr und gefahrenen Tunnel pro Jahr der Probanden, getrennt nach der Versuchsgruppe

besitzen. Einen Unterschied gibt es in den pro Jahr durchfahrenen Tunneln.

7.1.8 Abhängige Variable

Verhalten

Als abhängige Variable wird in den beiden Teilszenarien das Verhalten der Probanden erfasst:

- Teilszenario A

Erhoben werden sicherheitsrelevante Verhaltensweisen des Probanden. Dazu gehören:

 - Warnblinker einschalten,
 - Radio einschalten,
 - Motor abstellen,
 - Verlassen des Fahrzeugs.
- Teilszenario B

Erhoben wird das Verhalten der Probanden im Tunnel, insbesondere:

 - Wahl des Notausgangs/Notrufstation,
 - Bewegungsprofile der Fluchtwege,
 - Verweildauer im Tunnel,
 - Latenz bis zum Start der Selbstrettung.

Selbstberichtetes Erleben

Zusätzlich zu den Verhaltensdaten wird das subjektive Empfinden der Probanden mithilfe von Fragebögen erhoben, die zu Beginn und am Ende der Untersuchung ausgefüllt werden.

Folgende Fragebögen kommen zur Anwendung:

- State-Trait Anxiety Inventory (STAI) (LAUX 1981; SPIELBERGER, GORSUCH & LUSHENE, 1970)

Mit dem STAI-Fragebogen [32, 64] wird sowohl die allgemeine Ängstlichkeit einer Person (Trait), als auch ihre momentane Angst (State) gemessen. Diesen beiden Skalen werden jeweils mit 20 Fragen erfasst, die auf einer 4-stufigen Likert-Skala beantwortet werden. Die Trait-Skala wird dem Probanden dabei nur vor dem Versuchsstart vorgelegt, die State-Skala wird durch den Probanden sowohl vor als auch nach dem Versuch ausgefüllt.

- Tunnelangstfragebogen (TAF) (MÜHLBERGER & PAULI 2000)

Mithilfe des Tunnelangstfragebogens [39] wird die Angst der Probanden vor einer Tunneldurchfahrt, als Fahrer oder als Beifahrer, gemessen. Der Fragebogen besteht aus jeweils 10 Items für Fahrer und Beifahrer, welche die Angst in Tunneln erfassen sowie jeweils einem zusätzlichen Item, das die Erleichterung beim Verlassen eines Tunnels erfasst. Die Bewertungen werden auf einer 5-stufigen Likert-Skala angegeben, von 0 (überhaupt keine Angst) bis 4 (extreme Angst) (MÜHLBERGER & PAULI 2000).

- Self-Assessment Manikin (SAM) (BRADLEY & LANG 1994)

Mithilfe des SAM [4] lassen sich Erregung, Valenz und Dominanz (Kontrolle) des Probanden erfassen. Die Einschätzung erfolgt jeweils auf einer 9-stufigen Skala. Die einzelnen Antwortmöglichkeiten werden dabei durch eine gezeichnete Person repräsentiert, die den jeweiligen Gefühlszustand repräsentiert.

- Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) (KENNEDY, LANE, BERBAUM & LILIENTHAL 1993)

In virtuellen Umgebungen kann es bei einigen Personen zur sogenannten Simulatorkrankheit kommen. Sie ist gekennzeichnet durch Schwindel und Übelkeit und kann dadurch das Erleben der virtuellen Welt beeinträchtigen. Mithilfe des SSQ [26] werden die Symptome der Simulatorkrankheit mithilfe von drei Skalen erhoben (Übelkeit, Verwirrung und okulomotorische Probleme). Die Einschätzung der Symptome wird auf 16 Items auf einer 5-stufigen Likert-Skala von 0 (gar nicht) bis 4 (schwer) angegeben.

- Fragebogen zur Situation im Tunnel

Alle Probanden bekommen einen Fragebogen mit speziellen Fragen zur Situation im Tunnel. Mit diesem wird erfasst was die Probanden während des Versuchs wahrgenommen haben (Sicherheitstechnik, andere Fahrzeuge, ...) und wie sie die Situation erlebt haben. In Gruppe A sind diese Fragen um spezielle Fragen zur BBA erweitert.

- Befragung während der Untersuchung

Zusätzlich erfolgt nach jeder Fahrt der Übung und des Fahrscenarios eine kurze Befragung direkt in der CAVE, bei dem die Probanden ihre Einschätzungen mithilfe eines Eingabegeräts wiedergeben. Dabei werden die Probanden gefragt:

- wie gefährlich sie die Situation einschätzten,
- wie sicher sie sich waren, was in der Situation zu tun ist,
- wieviel Angst sie in der Situation hatten.

7.1.9 Schlussfolgerungen Methodik

In der Untersuchung wird speziell der Einfluss einer aktivierten BBA auf die Nutzer, die sich in ihrem Einflussbereich befinden, untersucht. Durch die Kombination von Verhaltensdaten und Fragebogendaten lässt sich ein umfassendes Bild über das Verhalten und Erleben der Probanden geben. Dieses ermöglicht es Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Verhalten und Erleben der Versuchsgruppen aufzuzeigen und Rückschlüsse auf den Einfluss der Aktivierung einer BBA auf das Erleben und Verhalten von Nutzern zu zeigen, die sich in dem Aktivierungsbereich aufhalten. Zusätzlich wird der Einfluss des Halte- bzw. Standpunktes bei Aktivierung der BBA in einer explorativen Zusatzerhebung untersucht. Einschränkend muss erwähnt werden, dass nur optische und akustische Einwirkungen simuliert werden, und dadurch der Einfluss zusätzlicher haptischer Erfahrungen (insbesondere Nässe) nicht erfasst werden.

7.2 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Probandenversuche dargestellt. Dabei wird auf der einen Seite auf das Erleben und die Bewertungen der Probanden eingegangen, auf der anderen Seite wird ihr Verhalten analysiert.

7.2.1 Fragebogenbefragung

Befragung während des Versuchs

Die Probanden wurden nach jeder Fahrt gefragt, wie gefährlich die Situation war, wie sicher sie sich in der Situation gefühlt haben und wie viel Angst sie hatten. Die Antworten wurden auf einer Skala von 1 (sehr wenig) bis 10 (sehr viel) gegeben. Von besonderem Interesse war hier die Bewertung nach der Ereignisfahrt. Hier zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen (s. Tabelle 12).

Frage	Mittelwert (Standardabweichung)		Signifikanzwert
	Gruppe „mit BBA“	Gruppe „ohne BBA“	
Gefährlichkeit	6.12 (2.55)	6.92 (2.41)	p = .647
Sicherheit	4.96 (2.34)	4.80 (2.22)	p = .628
Angst	4.40 (2.63)	4.16 (2.12)	p = .570

Tab. 12: Mittelwerte und Signifikanz für die Bewertung der Ereignisfahrt in den Versuchsgruppen

Wahrgenommene Sicherheitseinrichtung

Nach dem Ende des Versuchs wurden die Probanden gefragt, welche Sicherheitseinrichtungen sie im Straßentunnel wahrgenommen hatten. Dabei gaben fast alle Probanden an, dass sie den Notausgang (46 von 50) und die Fluchtwegkennzeichen (41 von 50) gesehen haben. Die Notrufstation wird von ca. 2/3 der Probanden gesehen (34 von 50) und auch an die Nothaltebucht, welche die Probanden während der Fahrt passierten, erinnern sich ca. 2/3 (33 von 50). Die Notgehwege werden nur von ca. der Hälfte der Probanden als solche erkannt (26 von 50).

Die beiden Versuchsgruppen unterscheiden sich größtenteils nicht in der Anzahl der wahrgenommenen Sicherheitseinrichtungen. Nur die Fluchtwegkennzeichen werden in der Bedingung mit aktivierter BBA marginal signifikant häufiger gesehen als in der Bedingung ohne BBA ($t(48) = 1.87, p = .068$). Dies mag dadurch begründet sein, dass sie für die Orientierung bei der Flucht in dieser Gruppe von größerer Bedeutung waren.

7.2.2 Fragebogen zur BBA

Probanden in der Gruppe mit BBA füllten nach dem Versuch einen Fragebogen aus, indem sie zu ihrer Meinung zu verschiedenen Aspekten der BBA befragt wurden.

Dabei sollten Sie auf der einen Seite subjektive Empfindungen und wahrgenommene Veränderungen der Umgebung im Zusammenhang mit der BBA beschreiben. Auf der anderen Seite wurden sie zu ihrer Einstellung gegenüber der BBA befragt.

Wissen über die Verbreitung von Brandbekämpfungsanlagen

Zu Beginn wurde untersucht wie gut Probanden über die Verbreitung von BBA in Deutschland informiert sind. Dabei sollten Sie angeben, ob eine BBA ihrer Meinung nach zur Standardausstattung von Straßentunneln gehört und in wie viel Prozent der Tunnel eine BBA eingebaut ist. Dabei zeigte sich, dass ca. 2/3 der Probanden (16 von 25) der Meinung sind, dass eine BBA zur Standardausstattung von Straßentunneln gehört. Ca. 1/3 der Probanden glaubten dies nicht (9/25) Auch die prozentuale Anzahl an Tunneln mit BBA wird deutlich überschätzt (s. Bild 23).

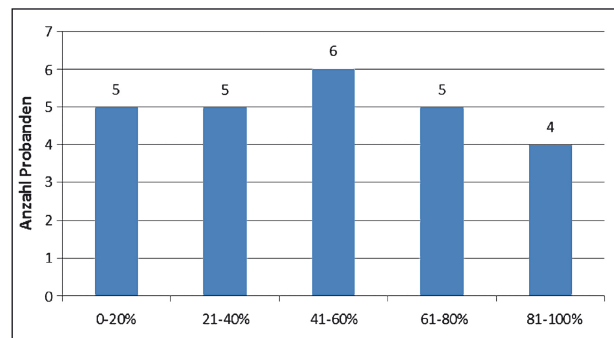


Bild 23: Geschätzter Prozentwert der Tunnel, in denen eine BBA eingebaut ist

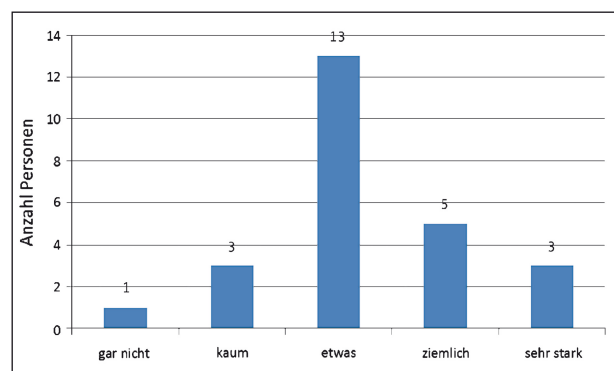


Bild 24: Beurteilung der Probanden, inwieweit der Wasserebel eine Gefahr für sie darstellte

Bewertung der Wasserebelanlage

Des Weiteren wurden die Probanden gefragt, ob sie das Gefühl hatten, dass der Wasserebel eine Gefahr für sie darstellt. Es zeigt sich, dass der Großteil der Probanden im Wasserebel zumindest eine mögliche Gefahr sah (s. Bild 24). Hierbei ist zu beachten, dass die Frage im Zuge der Nachbefragung gestellt wurde. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die Angst der Probanden auf die Situation im Tunnel bezieht, aufgrund derer der Wasserebel aktiviert wird als auf den Wasserebel selbst.

Außerdem wurden die Probanden gefragt, wie sehr es sie überrascht hat, als die BBA aktiviert wurde. Hierbei zeigt sich, dass die meisten Probanden durch die Aktivierung der BBA überrascht wurden (s. Bild 25).

Beeinflussung des Verhaltens durch die BBA

Zusätzlich wurden die Probanden gefragt, ob der Wasserebel ihre Entscheidung beeinflusst hat, das Fahrzeug zu verlassen. Dabei zeigt sich ein geteiltes Bild. Etwa die Hälfte der Probanden gab an, dass sie in ihrer Entscheidung vom Wasserebel beeinflusst wurden, die andere Hälfte nicht (s. Bild 26).

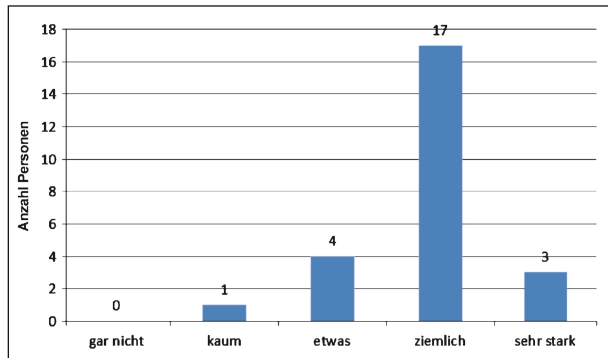


Bild 25: Beurteilung der Probanden, wie überraschend die Aktivierung der BBA war

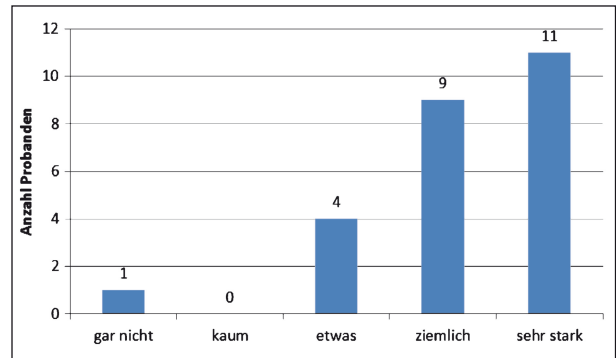


Bild 27: Empfundene Sichteinschränkung durch die BBA innerhalb des Fahrzeugs

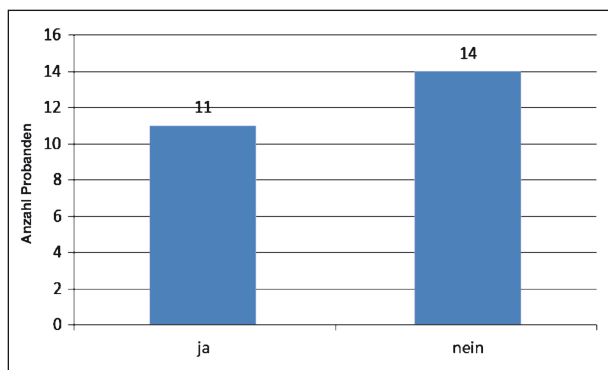


Bild 26: Angaben der Probanden, ob ihre Entscheidung das Fahrzeug zu verlassen durch den Wasserdampf beeinflusst wurde

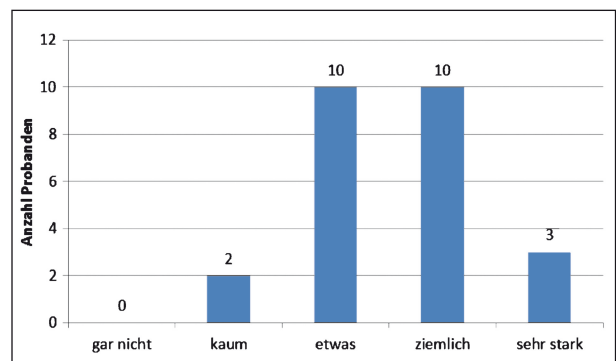


Bild 28: Empfundene Sichteinschränkung durch die BBA außerhalb des Fahrzeugs

Interessanterweise begründeten einige Probanden, die angaben, durch den Wasserdampf in ihrem Verhalten beeinflusst worden zu sein, damit, dass sie im Wasserdampf nichts mehr gesehen hätten und deshalb das Fahrzeug verlassen hätten. Andere stiegen zwar aus, gaben aber an, dass sie durch den Wasserdampf verunsichert wurden, da die Situation unübersichtlich wurde.

Probanden, die angaben nicht beeinflusst worden zu sein, erkannten die Situation als potenziell gefährlich und wollten das Fahrzeug aufgrund des Feuers und des Rauchs auf jeden Fall verlassen.

Probanden, die nicht beeinflusst wurden, erkannten die Situation als potenziell gefährlich und wollten das Fahrzeug aufgrund des Feuers und des Rauchs auf jeden Fall verlassen.

Sichtverhältnisse

Die Sichtverhältnisse der Probanden wurden innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs durch die BBA deutlich eingeschränkt. Dabei

war die Beeinträchtigung im Fahrzeug größer als außerhalb des Fahrzeugs (s. Bild 27 und Bild 28).

Bewertung einer BBA

Alle Probanden der Bedingung „mit BBA“ sahen die Auswirkungen einer BBA auf die Sicherheit im Tunnel als positiv an (s. Bild 29).

Insgesamt würden die meisten Probanden, die im Versuch mit einer BBA konfrontiert waren, den Einbau von BBA als Standardausrüstung in Straßentunneln begrüßen (s. Bild 30).

Die Probanden in der Bedingung ohne BBA wurden ebenfalls befragt, ob sie den Einbau einer BBA in einen Straßentunnel befürworten würden. Dafür wurde ihnen eine kurze schriftliche Beschreibung einer BBA vorgelegt. Etwa zwei Drittel der Probanden würden einen Einbau gutheißen (16 von 23). Auch in dieser Gruppe zeigt sich demnach eine Befürwortung des Einbaus einer BBA in einen Straßentunnel.

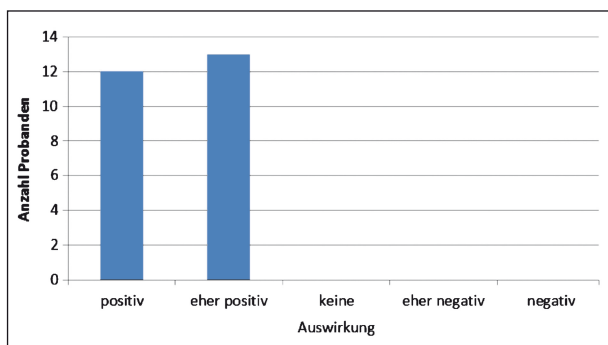


Bild 29: Einschätzungen, wie sich eine BBA auf die Sicherheit in Straßentunneln auswirkt

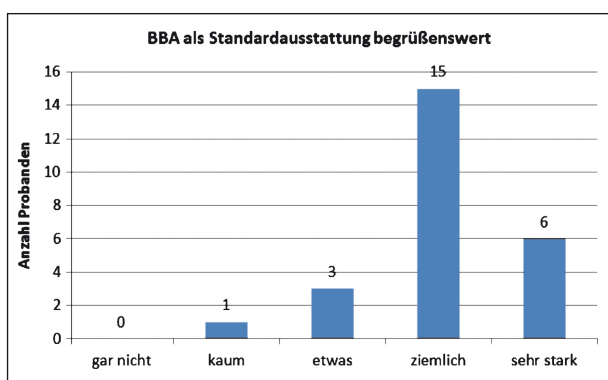


Bild 30: Meinung von Probanden aus der Gruppe mit BBA zum Einbau einer BBA in einen Straßentunnel

7.2.3 Verhaltensdaten

Fahrszenario (Versuchsteil A)

Untersucht wurden die Verhaltensdaten während die Probanden noch im Fahrzeug sitzen. Von besonderem Interesse ist es dabei, ob und wann die Probanden das Fahrzeug verlassen.

Alle 50 Probanden verließen innerhalb von 30 Sekunden, nachdem die Durchsage beendet war, das Fahrzeug. Das heißt, sowohl in der Bedingung mit BBA als auch in der Bedingung ohne BBA verließen alle Probanden ihr Fahrzeug.

Unterschiede finden sich in der Zeit, die es dauert, bis die Probanden das Fahrzeug verließen. Hier findet sich ein statistisch marginal signifikanter

Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen. Dabei brauchen Probanden in der Bedingung mit BBA länger, um ihr Fahrzeug zu verlassen ($t(48) = 1.82, p = .075, d = .51$). Die Effektstärke von $d = .51$ entspricht einem mittelgroßen Effekt. Ca. 25 % der aufgetretenen Varianz im Verhalten lässt sich durch die Aktivierung der Wassernebelanlage erklären. Dies zeigt, dass die Wassernebelanlage einen bedeutsamen Einfluss auf das Verhalten der Probanden hatte (s. Tabelle 13).

Da fünf Probanden das Fahrzeug verlassen haben, bevor die erste Durchsage beendet war, wurden in einem zweiten Schritt diese Probanden ausgeschlossen, um nur den Effekt der BBA abzubilden. Zwei Probanden wurden in der Bedingung mit BBA und drei in der Bedingung ohne BBA ausgeschlossen. Es zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie ohne den Ausschluss ($t(43) = 2.01, p = .051, d = .60$).

Fluchtszenario (Versuchsteil B)

Im Versuchsteil B wurden die fluchtrelevanten Verhaltensweisen untersucht. Dazu gehören die Ziele, zu denen die Probanden flüchteten. Hierbei zeigt sich zwischen den beiden Versuchsgruppen kein Unterschied. Der Großteil der Probanden floh zum nächstgelegenen Notausgang. In der Bedingung „mit BBA“ flohen 19 der 25 Probanden (76 %) zum nächstgelegenen Notausgang, in der Bedingung „ohne BBA“ waren es 22 der 25 Probanden (88 %). Wenige Probanden suchten die Notrufstation auf oder flohen in Richtung Portal zu den weiter entfernten Sicherheitseinrichtungen (s. Bild 31).

Untersucht wurden auch die Fluchtwege der Probanden. Um dies zu untersuchen, wurde der Tunnel in Unterabschnitte unterteilt. Die Breite des Tunnels war dadurch in acht Abschnitte unterteilt. Als „Nahe an der Tunnelwand“ wurden zwei Abschnitte am linken und ein Abschnitt am rechten Rand des Tunnels definiert. Die Tunnelmitte entsprach drei der vier mittleren Abschnitte. Einer der mittleren Abschnitte sowie ein Abschnitt auf der rechten

Bedingung	Gesamtgruppe (n = 50)		Teilgruppe der nach Durchsage Ausgestiegenen (n = 45)	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
mit BBA	6.40 Sek.	7.79 Sek.	7.69 Sek.	6.47 Sek.
ohne BBA	2.45 Sek.	7.55 Sek.	4.41 Sek.	4.12 Sek.

Tab. 13: Mittelwert und Standardabweichung (SD) der Ausstiegszeit in Sekunden getrennt nach der Bedingung (Mittelwerte beziehen sich auf die vergangene Zeit nach dem Ende der ersten Durchsage in Sekunden)

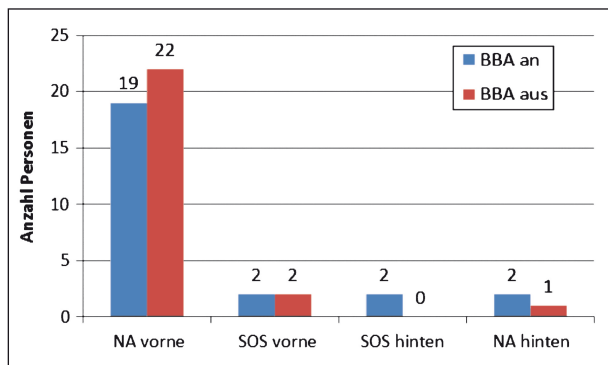


Bild 31: Fluchtziele der Probanden getrennt nach der Bedingung

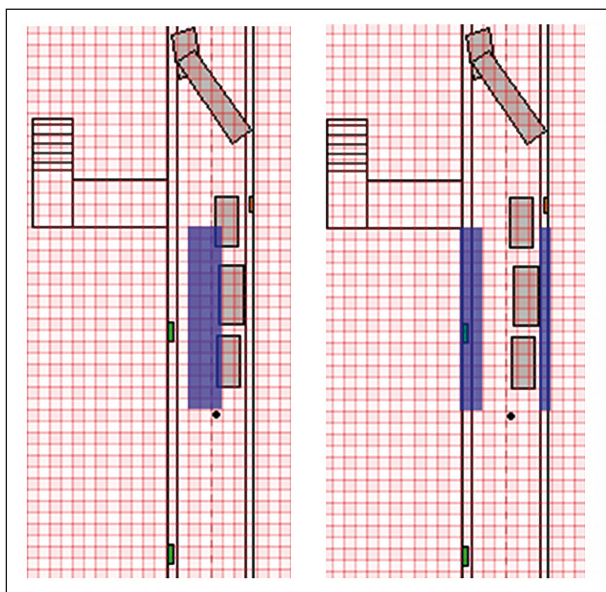


Bild 32: Bereiche des Tunnels in denen die Anzahl der Probanden, die sie betraten, verglichen wurden; (links: Bereiche „innen“, rechts: Bereiche „in der Nähe der Tunnelwand“)

Seite wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen, da diese durch Fahrzeuge blockiert waren und von den Probanden deswegen auch nicht für die Flucht genutzt werden konnten (s. Bild 32).

Dabei zeigten sich Unterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen. Probanden in der Bedingung „mit BBA“ flohen häufiger in der Nähe der Tunnelwände entlang ($t(48) = 2.01, p = .05, d = .57$), wohingegen Probanden in der Bedingung „ohne BBA“ auf direktem Weg in der Mitte des Tunnels zum Notausgang flüchteten ($t(48) = 3.03, p = .004, d = .86$) (s. Bild 33).

Die verschiedenen Laufwege führten jedoch nicht zu einer längeren Fluchtzeit einer der beiden Gruppen. In beiden Gruppen brauchten die Probanden, die zu den nächstgelegenen Sicherheitseinrich-

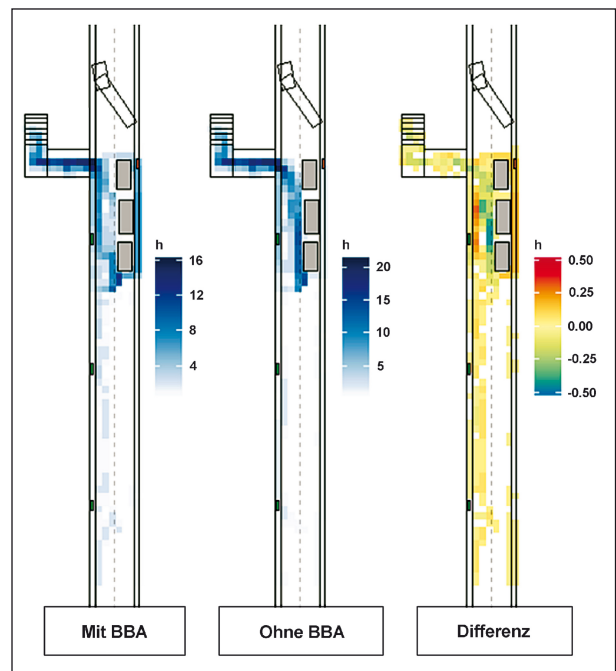


Bild 33: Häufigkeit mit der Probanden bestimmte Tunnelabschnitte betreten. („Differenz“ zeigt die relative Häufigkeit mit der Probanden einen Tunnelabschnitt betreten, in Abhängigkeit der Versuchsgruppen. Je röter der Bereich, desto häufiger waren Probanden aus der Versuchsgruppe „mit BBA“ in diesem Bereich)

Bedingung	Mittelwert	Standardabweichung (SD)
mit BBA	27.69 Sek.	8.76 Sek.
ohne BBA	26.78 Sek.	12.31 Sek.

Tab. 14: Durchschnittliche Fluchtzeit der Probanden, die zum nächstgelegenen Notausgang oder Notrufstation flohen

tungen (Notausgang, Notrufstation) flohen in etwa die gleiche Zeit (s. Tabelle 14).

7.2.4 Fluchtverhalten außerhalb der BBA (Zusatzgruppe)

Zusätzlich zu den zwei experimentellen Versuchsgruppen wurde eine dritte Gruppe mit zehn Probanden erhoben, bei denen die BBA aktiviert wurde, die Probanden aber außerhalb des Wassernebels zum Stehen kamen. Da sich diese Gruppe nur in dem Ort des Anhaltens (innerhalb des Einflussbereichs der BBA oder vor dem Einflussbereich des BBA) unterschieden, kann diese Zusatzgruppe genutzt werden, die Frage nach der Bedeutung dieser Variable zu untersuchen.

Die Probanden dieser Bedingung unterscheiden sich in ihren Verhaltensweisen von der Bedingung

Bedingung	Gesamtgruppe (n = 35)		Teilgruppe der nach Durchsage Ausgestiegenen (n = 28)	
	Mittelwert	SD	Mittelwert	SD
mit BBA	6.40 Sek.	7.79 Sek.	7.69 Sek.	6.47 Sek.
außerhalb BBA	- 0.11 Sek.	2.07 Sek.	1.32 Sek.	1.31 Sek.

Tab. 15: Mittelwert und Standardabweichung der Ausstiegszeit der Probanden getrennt nach den Bedingungen. Die Mittelwerte beziehen sich auf die vergangene Zeit nach dem Ende der ersten Durchsage in Sekunden

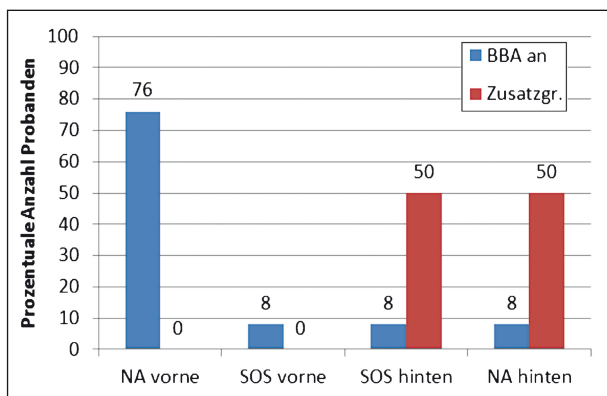


Bild 34: Fluchtziele der Probanden in Prozent getrennt nach der Bedingung

„mit BBA“. Sie verlassen das Fahrzeug signifikant früher als die Probanden in der Bedingung „mit BBA“ ($t(33) = 2.59, p = .014, d = .87$) (s. Tabelle 15).

Da sieben Probanden das Fahrzeug verlassen haben bevor die erste Durchsage beendet war, wurden in einem zweiten Schritt diese Probanden ausgeschlossen, um nur den Effekt der BBA abzubilden. Zwei Probanden wurden in der Bedingung „mit BBA“ und fünf in der Bedingung „außerhalb BBA“ ausgeschlossen. Es zeigt sich ein ähnlicher Effekt wie ohne den Ausschluss ($t(26) = 2.16, p = .040, d = .82$).

Auch in ihren Fluchtzielen unterscheiden sich die Probanden der Zusatzgruppe „vor der BBA“ von den Probanden Bedingung „mit BBA“. Alle Probanden der Fluchtgruppe flohen zu Sicherheitseinrichtungen in Richtung Portal (s. Bild 34).

Zur Zusatzgruppe ist allgemein anzumerken, dass die Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht interpretiert werden müssen. Die Versuchsgruppe war deutlich kleiner als die anderen beiden Versuchsgruppen und wurde im Anschluss an die beiden anderen Versuchsgruppen erhoben.

Aus diesen Gründen ist nicht auszuschließen, dass die Ergebnisse aufgrund von externen Ereignissen

beeinflusst sein könnten, denen die anderen beiden Versuchsgruppen nicht ausgesetzt waren.

7.3 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen diskutiert und miteinander in Zusammenhang gesetzt.

7.3.1 Fragebogendaten

Der Vergleich zwischen den Versuchsbedingungen ergab, dass das Szenario „ohne BBA“ im Vergleich zum Szenario „mit BBA“ als ähnlich gefährlich eingeschätzt wurde und die Probanden ähnlich viel Angst angaben. Auf diese Aspekte scheint die BBA keinen direkten Einfluss zu nehmen.

Das Ergebnis deutet darauf hin, dass andere Aspekte der Situation, wie zum Beispiel das Feuer oder der Rauch der Haupteinflussfaktor für die Bewertung der Gefährlichkeit oder der eigenen Angst sind. Die BBA hat, im Gegensatz zu diesen Aspekten, einen geringeren Einfluss, der bei der Bewertung nicht zum Tragen kommt.

7.3.2 Wahrnehmung von Sicherheitselementen

Überraschend ist das Ergebnis, dass bei aktivierter BBA genau so viele Sicherheitseinrichtungen wahrgenommen werden wie bei nicht aktivierter BBA. Dies lässt sich wahrscheinlich dadurch erklären, dass die BBA im Fahrscenario erst nach einer gewissen Zeit aktiviert wurde und die Probanden davor bereits Zeit hatten sich im Tunnel umzusehen, während sie im Fahrzeug saßen.

Interessanter Weise sahen die Probanden in der Bedingung „mit BBA“ sogar häufiger die Fluchtwegkennzeichen im Tunnel. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass sie aufgrund der eingeschränkten Sicht häufiger an den Wänden des Tunnels entlang flohen und somit direkt an den Fluchtwegkenn-

zeichen vorbeikamen bzw. diese auch für ihre Orientierung nutzten (s. auch Kapitel 7.3.4).

7.3.3 Fragebogenbefragung zur BBA

Die Befragung der Versuchsgruppe „mit BBA“ nachdem sie die Aktivierung einer BBA in dem Untersuchungsszenario erlebt hatten, zeigt ein interessantes Bild. Wie erwartet gaben die Probanden an, dass die aktivierte BBA die Sicht sowohl im Fahrzeug als auch außerhalb des Fahrzeugs deutlich verschlechtert hat. Außerdem wurden die meisten Probanden durch die Aktivierung der BBA überrascht und glaubten auch, dass der Wasserdampf eine Gefahr darstellte. Trotzdem steht ein Großteil der Probanden dem Einbau einer BBA in einen Straßentunnel positiv gegenüber und die Auswirkungen auf die Sicherheit werden von allen Probanden als positiv eingeschätzt. Die erwarteten Vorteile der BBA durch die Unterdrückung des Feuers scheinen die negativen Aspekte deutlich zu überwiegen.

Ähnlich war die Einstellung der Probanden in der Versuchsgruppe „ohne BBA“. Diese Gruppe erhielt nur eine kurze schriftliche Erklärung über eine BBA und sollte danach angeben, ob sie den Einbau einer BBA in Straßentunneln befürworten würden. Auch in dieser Gruppe stand ein Großteil der Probanden dem Einbau positiv gegenüber.

Obwohl die Aktivierung der BBA für die meisten Probanden überraschend war, geht ein Großteil der Teilnehmer in der Versuchsgruppe „mit BBA“ davon aus, dass eine BBA zur Standardausrüstung von Straßentunneln gehören. Probanden erwarten demnach eine BBA als Standardausrüstung, sind aber trotzdem überrascht, wenn sie im Tunnel aktiviert wird. So verteilen sich die prozentualen Schätzungen, in wie vielen Tunneln eine BBA ist, fast gleichmäßig von 5-100 %. Einige Probanden erwarten eine BBA in über 90 % der Tunnel. Die Frage nach der Anzahl von Tunneln, die mit einer BBA ausgestattet sind, zeigt sehr deutlich, dass die Probanden in dieser Hinsicht nicht korrekt informiert waren.

7.3.4 Verhaltensdaten

Fahrscenario

Das interessanteste Ergebnis des Fahrscenario stellt der Einfluss der BBA auf das Ausstiegsverhalten der Probanden dar. Keiner der Probanden

ließ sich durch die aktivierte BBA davon abhalten das Fahrzeug zu verlassen, nachdem er durch die Durchsage dazu aufgefordert wurde, den Tunnel zu verlassen. Teilweise gaben einige Probanden in der Bedingung mit BBA an, dass sie ihr Fahrzeug aufgrund der schlechten Sichtverhältnisse verlassen haben und sie die Hoffnung hatten, dass sie außerhalb des Fahrzeugs mehr Informationen gewinnen können. Die BBA hatte hier also einen positiven Einfluss auf das Ausstiegsverhalten. Einschränkung ist bei diesem Ergebnis zu erwähnen, dass die haptische Rückmeldung des Wasserdampfs in der CAVE nicht gegeben war. Probanden mussten demnach keine Nässe oder Kälte befürchten, wenn sie das Fahrzeug verließen. Inwieweit Nässe und Kälte das Aussteigen verhindert hätten, ist nicht abschließend zu klären. Wenn man jedoch bedenkt wie schnell die Probanden auf die Durchsage reagierten und diese befolgten, so ist anzunehmen, dass sich nur wenige von Nässe oder Kälte hätten zurückhalten lassen. Dies ist aber nur eine Spekulation und nicht durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt.

Ein Unterschied zwischen den Versuchsgruppen findet sich in der Latenz bis zum Ausstieg. Mit aktivierter BBA verließen die Probanden das Fahrzeug durchschnittlich nach 7 bis 8 Sekunden, nachdem sie von der Durchsage zur Flucht aufgefordert wurden. Probanden in der Bedingung ohne BBA brauchten durchschnittlich nur 4 bis 5 Sekunden. Es ist möglich, dass die erwartete Nässe und Kälte der BBA diese Latenzzeit weiter verlängern könnte.

Die Auswertung der Versuchsgruppe, die außerhalb des Einflussbereichs der BBA zum Stehen kam, ergab, dass auch diese Probanden das Fahrzeug zügig verlassen. Interessanterweise verlassen die Probanden außerhalb des Einflussbereichs der BBA ihr Fahrzeug schneller als die Probanden innerhalb des Einflussbereichs. Dies bestätigt die Ergebnisse, dass die aktivierte BBA die Latenz bis zum Aussteigen erhöht, wenn sich ein Proband in dessen Einflussbereich befindet.

Fluchtszenario

Im Fluchtszenario wurden unter anderem die Fluchtziele der Probanden untersucht. Dabei zeigen sich keine Unterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen mit und ohne BBA. In beiden Bedingungen flieht ein Großteil der Probanden zum nächstgelegenen Notausgang („Mit BBA“: 76 %; „ohne BBA“: 88 %). In beiden Bedingungen fliehen

jeweils zwei Probanden zur Notrufstation gegenüber dem Notausgang. Dieses Verhalten scheint in dem gegebenen Szenario als gefährlich, da sich die Notrufstation nahe am Unfall-Lkw befand und die Probanden wichtige Zeit verloren hätten, während sich der intensive Rauch ausbreitet.

Vier Probanden in der Bedingung „mit BBA“ fliehen in Richtung Portal, jedoch nur ein Proband in der Bedingung „ohne BBA“. Auch wenn dies kein statistisch bedeutsamer Unterschied ist, könnte er darauf hinweisen, dass bei eingeschalteter BBA die Varianz des menschlichen Verhaltens zunimmt und mehr Personen nicht die optimale Fluchtentscheidung treffen.

In den Fluchtzielen unterscheidet sich die Zusatzgruppe „vor der BBA“ signifikant von der Gruppe „mit BBA“. Es zeigte sich, dass Probanden, die außerhalb des Wassernebels stehen, nicht in den Wassernebel hinein flohen, auch wenn sich im Einflussbereich des Wassernebels der nächstgelegene Notausgang befindet. Man muss also davon ausgehen, dass alle Personen, die bei einer Aktivierung einer BBA außerhalb des Wassernebels stehen, vom Wassernebel weg fliehen. Dies deckt sich mit Versuchen zu verrauchten Straßentunneln, in denen Probanden es vermieden verrauchte Bereiche zu betreten, um zu flüchten [54]. Auch wenn ein Vergleich der Studien mit Vorsicht zu betrachten ist, könnten die vorliegenden Ergebnisse darauf hinweisen, dass Bereiche mit schlechter Sicht nicht nur bei Rauch (als eindeutiges Gefahrensignal), sondern auch bei Wassernebel nicht betreten werden. Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen zum Fluchtverhalten in verrauchten Tunneln [20]. Bei verringerter Sicht kann die Tunnelwand als Orientierung dienen an der man entlanglaufen kann. Zusätzlich ist die Sicht an den Wänden des Tunnels im Wassernebel besser als in der Mitte des Tunnels. Auch die Fluchtwegkennzeichen sind an den Tunnelwänden und im Wassernebel bilden diese eine Orientierung wieweit der nächste Notausgang entfernt ist. Probanden ohne BBA konnten den Notausgang von ihrem Startpunkt sehen und benötigten demnach keine zusätzlichen Informationen. Übereinstimmend mit diesem Ergebnis, gaben in der Nachbefragung auch mehr Probanden aus der Bedingung „mit BBA“ an, dass sie Fluchtwegkennzeichen im Tunnel gesehen hatten. Probanden in der Bedingung „ohne BBA“ wählten für ihre Flucht häufiger die Tunnelmitte. Sie flohen also im direkten Weg zum Notausgang und gingen nicht erst in

Richtung einer Tunnelwand, um in der Nähe der Wand entlangzulaufen. Die Unterschiede in den Laufwegen führen aber nicht zu einer verlängerten Fluchtzeit. Probanden in beiden Gruppen brauchen gleich lange um ihr Fluchtziel zu erreichen.

Mögliche Probleme könnte es bei einer aktivierten BBA in einem breiteren Tunnel geben. Einige Probanden flohen an der rechten Tunnelwand und kreuzten dann in Unfallnähe die Fahrbahn, um zum Notausgang zu gelangen. In Tunneln mit mehr als zwei Fahrstreifen, und damit einer breiteren Grundfläche, könnten Personen davon abgehalten werden, die Tunnelseite zu wechseln, da sie eine längere Strecke mit schlechter Sicht zurücklegen müssten. Für diese Personen könnte sich die Fluchtzeit erhöhen.

7.3.5 Stärken und Grenzen der Studie

Die durchgeführte Untersuchung liefert aussagekräftige Ergebnisse für das Verhalten von Personen unter dem direkten Einfluss von Wassernebel und erste Erkenntnisse über das Verhalten von Personen außerhalb des Wassernebels. Sie liefert damit Aussagen über alle Tunnelnutzer die sich in einem Ereignisfall im direkten Einflussbereich des Unfalls befinden und somit als erstes und am direktesten gefährdet sind.

Insgesamt erscheint eine Verallgemeinerung der Ergebnisse über das untersuchte Szenario hinaus schwierig. Die Probanden in dieser Untersuchung befanden sich in unmittelbarer Nähe zum brennenden Lkw und im direkten Einfluss des Wassernebels. Durch die Nähe zum Unfall und die zusätzliche Handlungsaufforderung durch die Durchsage, ist es nicht verwunderlich, dass alle Probanden das Fahrzeug verließen, auch wenn Auswertungen von Tunnelunfällen (zum Beispiel im Mont Blanc-Tunnel) von Personen berichten, die ihr Fahrzeug nicht verließen. Das Verhalten von Probanden, die nicht in unmittelbarer Unfallnähe zum Halten gekommen wären, war nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung, und eine Verallgemeinerung auf solche Tunnelnutzer ist nicht möglich. Gerade in vielbefahrenen Tunneln können sich sehr schnell lange Staus bilden, sodass sich nur ein eher geringer Teil der Tunnelnutzer im direkten Einflussbereich des Unfalls befindet.

Des Weiteren ist es wichtig zu beachten, dass die haptischen Reize der BBA in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten. Es ist

wahrscheinlich, dass Kälte und Nässe einen direkten Einfluss auf das Verhalten von Personen nehmen. Inwieweit das haptische Erleben die Flucht behindert oder Personen vielleicht an der Flucht gehindert werden, ist aufgrund dieser Ergebnisse nicht abschließend zu beurteilen. Dieser mögliche Einfluss von Nässe und Kälte muss bei Überlegungen zum Einfluss der BBA auf das Erleben und Verhalten von Personen zusätzlich berücksichtigt werden.

7.3.6 Empfehlungen

Grundsätzlich sprechen die Ergebnisse aus den Probandenversuchen, also aus Sicht des menschlichen Erlebens und Verhaltens, eher für als gegen den Einbau einer BBA, solange Teile der Infrastruktur des Tunnels auf die Aktivierung einer BBA abgestimmt werden. Angemerkt werden soll hier aber nochmal explizit, dass die durchgeführten Untersuchungen nicht notwendiger Weise auf eine reale Ereignissituation generalisiert werden können, und nur Ansatzpunkte für die Vor- und Nachteile einer aktivierten BBA auf das menschliche Verhalten liefern können (siehe Limitationen). Außerdem wurde in den vorliegenden Untersuchungen nur eine sehr beschränkte Auswahl an Szenarien verglichen.

Akustische Warnungen

In dieser Untersuchung wurde eine in Tunneln übliche Durchsage verwendet, um die Probanden zum Verlassen des Tunnels aufzufordern. Diese war klar verständlich und wurde von der BBA nicht verzerrt. Die BBA stellte eine weitere Geräuschquelle dar, interagierte jedoch nicht mit der Durchsage, da die BBA erst nach einem vollständigen Durchlauf der Durchsage aktiviert wurde. Unter diesen Bedingungen verließen alle Probanden, unabhängig davon ob die BBA aktiviert wurde oder nicht, ihr Fahrzeug. Es erscheint wichtig, dass auch im realen Ereignis die Durchsage deutlich und klar verständlich ist, um das gewünschte Ziel der effektiven Selbstrettung zu erreichen.

Des Weiteren sollte die Durchsage zeitlich so früh wie möglich aktiviert werden. In dieser Untersuchung wurde die BBA direkt nach dem Ende der Durchsage aktiviert. Es zeigte sich, dass Probanden „mit BBA“ etwas länger sitzen blieben als Probanden „ohne BBA“. Diese Verzögerung ließe sich möglicherweise beheben, indem zwischen dem Ende der Durchsage und der Aktivierung der BBA

eine längere Zeitspanne eingeplant wird. Probanden „ohne BBA“ verließen ihr Fahrzeug meisten direkt nach Ende der ersten Durchsage. In einem Ereignisfall im Tunnel könnte es hilfreich sein, wenn die Tunneldurchsage mindestens 10-15 Sekunden vor der Aktivierung der BBA erfolgt ist. So hätten fast alle Tunnelnutzer ihr Fahrzeug bereits verlassen, wenn die BBA aktiv wird.

Die Durchsage könnte zusätzlich genutzt werden, um Probanden auf die Aktivierung der BBA vorzubereiten. Die subjektiven Einschätzungen der Probanden in dieser Untersuchung, dass der Wasserdampf eine Gefahr darstellen könnte und dass die Aktivierung überraschend kam, könnte dadurch abgeschwächt werden.

Wissen zu Brandbekämpfungsanlagen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Personen über die Häufigkeit von BBA in deutschen Straßentunneln schlecht informiert sind. Viele gehen davon aus, dass eine BBA schon zur Standardausstattung von Straßentunneln gehört und alle Probanden überschätzen die prozentuale Anzahl von Tunneln in denen eine BBA eingebaut ist. In diesem Bereich scheint ein Informationsbedarf in der Gesellschaft zu bestehen. Wir gehen davon aus, dass diese Überschätzung durch die häufige Präsenz einer BBA im Hochbau resultiert und das Wissen hierüber von den Probanden einfach auf Straßentunnel übertragen wird. Bei einer Zunahme von Straßentunneln mit eingebauter BBA würde es sich anbieten Informationen zur Wirkungsweise einer BBA in die Tunnelinformationen aufzunehmen.

Visuelle Sicherheitseinrichtung

In der vorliegenden Untersuchung sahen Probanden den Notausgang, bevor die BBA aktiviert wurde. Unter diesen Bedingungen floh der Großteil der Probanden auch im Wasserdampf zum nächstgelegenen Notausgang.

Eine gute Beschilderung mithilfe von Fluchtwegkennzeichen erscheint im Wasserdampf besonders wichtig, vor allem wenn sich kein Notausgang im direkten Sichtbereich befindet.

Wichtig ist die eindeutige Kennzeichnung von Notausgängen auch auf der gegenüberliegenden Tunnelwand. So können auch Personen, die an der Tunnelwand ohne Notausgang (in dieser Unter-

suchung die rechte Tunnelwand) entlang fliehen, eindeutig sehen, wann sie die Höhe eines Notausgangs erreicht haben. Die könnte vor allem in größeren Tunneln eine wichtige Hilfe sein, in denen man bei aktivierter BBA den Notausgang auf der anderen Seite des Tunnels trotz hinterleuchteter Beschilderung nicht mehr wahrnehmen kann.

8 Beurteilung der Wirksamkeit von BBA

8.1 Risikoanalytisches Modell

8.1.1 Einleitung

Neben einer Analyse der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen auf Basis von analytischen Überlegungen, Ergebnissen von Brandversuchen und der relativ begrenzten praktischen Erfahrungen soll eine Beurteilung der Wirksamkeit auch auf Basis systematischer Analysen mithilfe von Simulationen und Modellrechnungen erfolgen. Der Fokus ist dabei auf das Schutzziel Personenschutz gerichtet.

Ziel der Modellrechnungen ist es, die Wirkungen automatischer Brandbekämpfungsanlagen auf das Brandrisiko für die modellierten Tunneltypen zu bewerten, um

- eine quantitative Grundlage für die Kosten-Wirksamkeitsuntersuchung bzw. Life-Cycle-Kostenbewertung zu schaffen,
- den Einfluss verschiedener Parameter auf die Wirksamkeit einer solchen Anlage überprüfen zu können.

8.1.2 Modellgrundlage

Basis der Modellierung ist das Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln“ und das in diesem Forschungsvorhaben definierte Risikomodell. Dieses Risikomodell wird für die Zwecke des gegenständlichen Forschungsvorhabens in einigen Punkten und hinsichtlich einiger Parameter modifiziert, um die im Rahmen des gegenständlichen Projektes untersuchten Aspekte realitätsnäher abbilden zu können. Weiter ist die Wirkung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage in das Rauchausbreitungsmodell zu integrieren.

Zur Berechnung der statistisch erwartbaren Schadensausmaßwerte für Brandszenarien werden im ersten Schritt repräsentative Verkehrsszenarien ausgewählt und auf deren Basis die initiale Strömungsgeschwindigkeit sowie die Entwicklung der Längsströmung mittels eines eindimensionalen Strömungsmodells berechnet. Die resultierende Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit wird im dreidimensionalen Modell als Randbedingung aufgeprägt. Die Ergebnisse der dreidimensionalen Strömungssimulation (Rauch- und Gaskonzentrationen in Kopfhöhe) werden dann als Eingangsdaten für die Evakuierungssimulation verwendet. Überlagert man daraufhin die Ergebnisse der Evakuierungssimulation (max. zurückgelegte Distanz in Abhängigkeit des Ausgangsorts) mit der jeweiligen (statistisch erwartbaren) Notausgangskonfiguration, so erhält man jene Bereiche in der Umgebung des Brandorts, aus denen eine erfolgreiche Flucht nicht mehr möglich ist. Befinden sich in diesen Bereichen Personen, so ergibt sich daraus ein Personenrisiko. Das gewichtete Mittel über alle untersuchten Szenarien stellt das statistisch erwartbare Schadensausmaß für ein durchschnittliches Brandszenario dar.

8.1.3 Annahmen und Parameter für die Risikoberechnungen

Für die Zwecke des gegenständlichen Forschungsprojektes wurden für die Risikoberechnungen folgende Annahmen getroffen.

Strömungsmodell

In einem eindimensionalen Modell werden die geometrischen Charakteristiken (Länge, Querschnitt, Längsneigung) und das Verkehrsaufkommen sowie die Wirkung der Lüftung berücksichtigt. Maßgebliche Einflussfaktoren sind neben dem Verkehrsaufkommen die Reibung an der Tunnelwand, der Impulsverlust am Portal, die Strömungsverluste an stehenden Fahrzeugen, Lüftung und der Brandrauchauftrieb. Zusätzlich zur Erwärmung der Luft durch den Brand wurde auch die Abkühlung durch konvektive Verluste an der Tunnelwand berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass alle oben beschriebenen Einflussfaktoren einer zeitlichen Entwicklung unterliegen (instationäre Berechnung).

Die mittels des oben beschriebenen eindimensionalen Modells ermittelten Werte für die zum Zeitpunkt des Brandausbruchs vorherrschende Längsströmung, sowie die Geschwindigkeits-

entwicklung danach, werden als Randbedingung in der dreidimensionalen Simulationsumgebung FDS aufgeprägt. Dabei wird darauf geachtet, dass es durch diese Zwangsbedingungen zu keiner Beeinflussung der Rauchschiebung kommt.

Die Definition der Zwangsbedingung erfolgt am zuströmenden Portal. Wärmeausdehnung, Volumensverlust durch Absaugung und Abkühlung, sowie Einbringen der Brandgase wird in der dreidimensionalen Berechnung berücksichtigt.

Brandmodell

Im Brandmodell wird von einem Feststoffbrand ausgegangen, wobei drei unterschiedliche Brand-szenarien mit den in Tabelle 16 angeführten Quell-raten und Brandentwicklungszeiten angenommen werden.

Für den 50 MW-Brand werden keine eigenen Modellwerte Schadensausmaß Brand ermittelt und als Vereinfachung die Werte vom 30 MW Brand übernommen. Diese Vereinfachung wurde bereits in vorhergehenden Forschungsprojekten betrachtet und als zulässig angesehen.

Außerdem werden für das Brandmodell folgende vereinfachte Annahmen getroffen:

- lineare Brandentwicklung bis zur maximalen Brandleistung (durchschnittlicher Fall zwischen langsamer und explosiver Brandentwicklung),
- konstante Brandentwicklungszeiten abhängig von der maximalen Brandleistung,
- konstante Quellraten für Schadstoffe pro MW Brandleistung,
- keine Beeinflussung der Brandentwicklung/ maximalen Brandleistung durch die Längs-strömung.

Die zeitliche Entwicklung der einzelnen Abläufe ab Ereignisbeginn (Zeitpunkt 0 ist der Beginn

der Brandentwicklung) werden folgendermaßen definiert:

- Zeitbedarf für Branddetektion: 60 s.
- Zeitbedarf bis Wirksamwerden der Lüftung:
 - Bei Längslüftung
Aktivierung der Strahlventilatoren im Abstand von 10 Sekunden bis zum Erreichen der erforderlichen Zielgeschwindigkeit. Dies entspricht der üblichen Praxis und ist neben regelungstechnischen Gründen auf die Überlastung der Mittelspannungsversorgung bei gleichzeitigem Hochfahren zurückzuführen. Die zum Hochfahren eines Strahl-ventilators notwendige Zeit (bis Erreichen von 99 % der Schubleistung) wird mit 15 Sekunden angenommen.
 - Bei Rauchabsaugung
Die Zeit bis zum Erreichen der maximalen Absaugleistung (Verfügbarkeit an der Klappe) wird mit 60 Sekunden angenommen. Dies ist ein auf Messungen im Tunnel als Durchschnittswert für moderne Anlagen angenommener Durchschnittswert.
- Zeitbedarf bis Wirksamwerden einer Tunnel-sperre (Fahrzeuge halten an): 90 s.

Bild 35 stellt eine Zusammenfassung der zeitlichen Entwicklung der einzelnen Ereignisabläufe dar.

Für die Brandrauchausbreitungssimulationen werden folgende Standorte im Tunnel gewählt:

- Im Richtungsverkehrstunnel werden die Rauchausbreitung an drei Standorten im Tunnel simuliert, um Effekte der Freifahrphase (Einfluss auf die Strömungsentwicklung) und der resultierenden Staulänge realitätsnah abbilden zu können.
- Im Gegenverkehrstunnel werden wie im Rich-tungsverkehrstunnel 3 Standorte im Tunnel

Brandgröße	5 MW	30 MW	100 MW
CO ₂ [g/s]	0,46	2,8	9,2
CO [g/s]	0,018	0,108	0,36
HCN [g/s]	0,0045	0,0270	0,0900
Rußanteil [kg/kg]	0,1	0,1	0,1
Brandentwicklungszeit [s]	180	300	420

Tab. 16: Brandszenarien mit den jeweiligen Quellraten und Brandentwicklungszeiten [23]

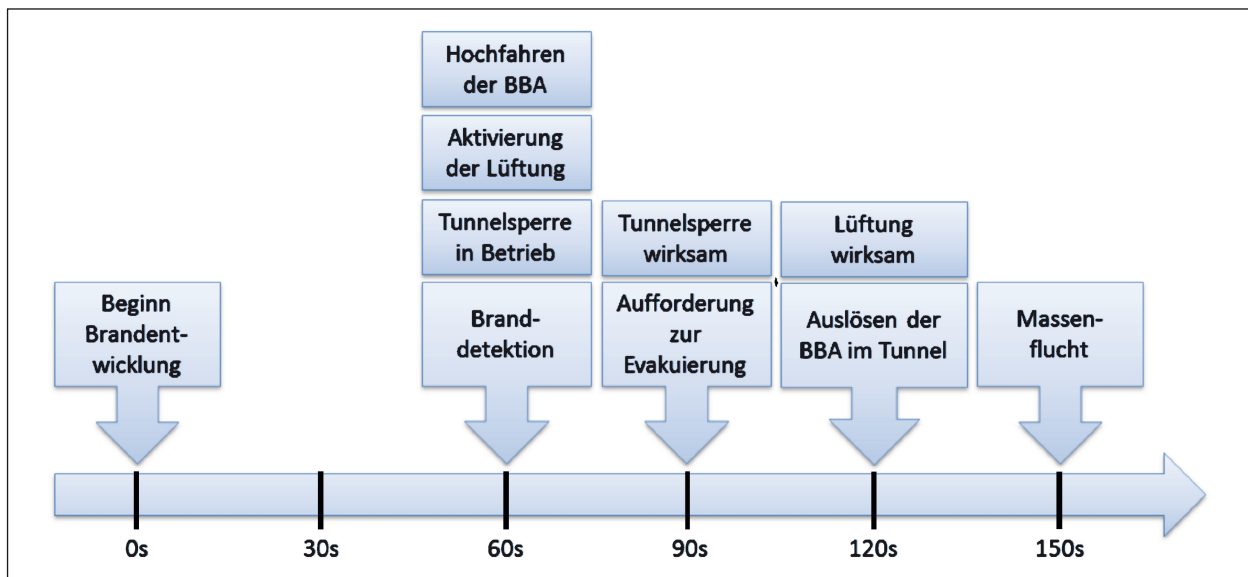


Bild 35: Zeitliche Entwicklung der einzelnen Ereignisabläufe nach einem Ereignis im Straßentunnel

simuliert. Dabei kommt der Freifahrphase eine noch größere Bedeutung zu als beim Richtungsverkehrstunnel, da sich je nach Lage Szenarien mit Strömungsumkehr durch asymmetrisches Freifahren ergeben können.

Personenmodell

Um in der Risikoanalyse das Verhalten der betroffenen Personen im Tunnel zu simulieren, werden standardisierte Annahmen getroffen, die eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglichen. Die Basisannahmen wurden mit dem Bearbeitungsmodul „Verhalten der Tunnelbenutzer“ abgestimmt. Diese werden für den Berechnungsfall „mit Aktivierung der BBA“ auf Basis der Ergebnisse dieses Moduls adaptiert. Insofern sind die Ergebnisse in der Risikoanalyse in keinem Fall eine Vorhersage von realen Schadensausmaßen bei einem tatsächlich auftretenden Ereignis, weil sich das menschliche Verhalten im Einzelfall völlig anders darstellen kann, als in der Risikoanalyse angenommen. Die Schadensausmaßswerte stellen jedoch den statistisch erwartbaren Mittelwert für Ereignisse mit einer bestimmten Brandleistung dar. Hierfür beinhaltet das Personenmodell wesentliche Komponenten, die eine realitätsnahe Abbildung und damit auch eine Bewertung in einem Vergleich ermöglichen. Dies sind insbesondere folgende:

- Beginn der Flucht bei wahrnehmbarer Bedrohung (Extinktionskoeffizient 0,1 in 1,6 m Höhe),
- Massenflucht nach 150 s (Aufforderung zur Evakuierung 90 s nach Ereignisbeginn zuzüglich Latenzzeit 60 s),
- Berücksichtigung von Fehlverhalten (3 % der Personen verhalten sich falsch und leiten die Flucht auch nach Aufforderung nicht ein),
- Unterschiedliche Fluchtgeschwindigkeiten durch Annahme mehrerer Personengruppen (männlich, weiblich, je 3 Alterskategorien, je 3 unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten); dadurch ergibt sich eine entsprechende Streuung, hinsichtlich der Fortbewegungsgeschwindigkeiten [1],
- Berücksichtigung der Sichtbehinderungen durch Brandrauch, durch Reduktion der Gehgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Extinktionskoeffizienten (Minimalwert: 0,36 m/s ab Extinktionskoeffizienten 0,5),
- Berücksichtigung der toxischen Wirkung der Rauchgase auf den menschlichen Organismus mittels Modell der akkumulierten Wirkung toxischer Gase von D. A. PURSER [54].

Berücksichtigung der Verkehrszustände

Die Verkehrszustände „fließender Verkehr“ und „Stau“ werden sowohl hinsichtlich der initialen Strömungssituation im Tunnel als auch hinsichtlich der Fahrzeugkonstellation im betroffenen Tunnelabschnitt bei der Simulation berücksichtigt.

Szenarien mit fließendem Verkehr beinhalten den durch Unfall oder Panne entstandenen Brand am Ort der initialen Verkehrsstörung (im Falle des Richtungsverkehrstunnels befinden sich dabei keine Personen im Abstrombereich des Brandes).

Szenarien mit Stau beziehen sich auf Verkehrszustände, bei denen der Verkehr bereits ohne eine Verkehrsstörung durch Unfall oder Panne durch Verkehrsüberlastung zum Erliegen gekommen ist. Die angenommene „Stop and Go“-Geschwindigkeit beträgt 15 km/h. Für diese Szenarien ist eine niedrige initiale Längsströmung und Vollstau im Tunnel (Fahrzeuge im Abstrom-Bereich des Brandes können nicht ungehindert aus dem Tunnel ausfahren) zugrunde gelegt.

Die Strömungen zu Brandbeginn werden von realistischen Verkehrsszenarien abgeleitet, da bei fließendem Verkehr die Fahrzeugbewegungen maßgebend für die Luftströmungen sind.

Die üblicherweise sehr unterschiedlich über den Tag verteilten Verkehrsstärken werden dahingehend berücksichtigt, dass für drei Verkehrsstärken (oberer, mittlerer und unterer Wert) die Modellwerte Schadensausmaß Brand ermittelt werden und daraus ein gewichteter Mittelwert für die Ereignisbäume herangezogen wird. Die drei unterschiedlichen Verkehrsstärken werden aufbauend auf Standard-Verkehrsganglinien ermittelt.

Für Gegenverkehrstunnel werden weiters die drei Verkehrsvolumina mit jeweils drei Verkehrssymmetriezuständen (Verteilung des Verkehrs auf positive und negative Fahrtrichtung) ermittelt, da diese einen wesentlichen Einfluss auf den im Tunnelinneren herrschende initialen Strömungszustand und die Entwicklung der Strömung während der Freifahrphase hat.

Wirkung der Tunnellüftung

Für das jeweilige Lüftungssystem wurde angenommen, dass die durch die Richtlinien vorgegebenen Soll-Werte entsprechend eingehalten werden können. Dazu wurde für jeden Tunnel eine Bemessung der Lüftung gem. RABT durchgeführt. Bei der Bemessung wurden die Bemessungsbrandleistungen gem. Tabelle 8 in den RABT für die jeweilige Tunnelkonfiguration berücksichtigt.

In Gegenverkehrstunneln und Richtungsverkehrstunneln mit Stau vor oder hinter dem Brandort erfolgt die Brandfall-Lüftung folgendermaßen, um

eine eventuell vorhandene Rauchschiichtung nicht zu stören:

- Längsgeschwindigkeit $\leq 1,5$ m/s,
- kein Strahlventilatorbetrieb im Bereich der Rauchschiichtung.

In Richtungsverkehrstunneln ohne Stau erfolgt der Rauchabtrieb mit „kritischer Längsgeschwindigkeit“ gem. Tabelle 10 in den RABT. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass bei einem Unterschreiten einer Minimalgeschwindigkeit von 1 m/s die Betriebslüftung aktiviert wird.

8.1.4 Modellierung der Wirkung einer automatischen Brandbekämpfungsanlage

Als Grundlage für die Modellierung der Wirkungen einer automatischen Brandbekämpfungsanlage in einem Straßentunnel wird eine Wassernebelanlage gewählt, weil für diesen Anlagentyp die meisten Ergebnisse und Auswertungen von Großbrandversuchen vorliegen. Die Wassernebelanlage wurde entsprechend der Anlagenkonfiguration erläutert in Kapitel 6.3.2 definiert.

Die Wirkung von Brandbekämpfungsanlagen auf die Rauch- und Temperaturentwicklung bei Tunnelbränden wird mithilfe von CFD (Computational Fluid Dynamics) untersucht. Konkret wird dafür das 3D-Strömungssimulationsprogramm FDS angewendet – so wie für die Simulation der Rauchausbildung von Tunnelbränden ohne Brandbekämpfungsanlage auch.

Grundsätzlich wird bei der Wirkung von Brandbekämpfungsanlagen zwischen der Nah- und der Fernwirkung unterschieden, wobei die Nahwirkung die Pyrolyse und damit die Brandrate betrifft und die Fernwirkung die Temperatur und Verrauchung (Rauchschiichtung) im Tunnelquerschnitt anbelangt. Die Modellierung von Brandbekämpfungsanlagen mit Hinblick auf die beiden Wirkungsweisen folgt zwei grundsätzlich verschiedenen Ansätzen, die im weiteren erläutert werden.

Modellierung mit Hinblick auf die Nahwirkung

Unter der Nahwirkung von Brandbekämpfungsanlagen versteht man ihren Einfluss auf die Pyrolyse und damit auf die Brandrate.

Grundsätzlich besteht bei FDS die Möglichkeit, die physikalische Wirkung von Wassertropfen oder

Wassernebel auf die Pyrolyse zu simulieren. Gegen eine solche Vorgehensweise sprechen jedoch drei Argumente:

- Um den komplexen Pyrolyseprozessen gerecht zu werden, wird eine äußerst feinmaschige Simulation mit Zellengrößen im Zentimeterbereich benötigt. Ein solches Modell zu erstellen ist äußerst arbeitsintensiv, es zu anschließend zu berechnen stellt außerordentliche Ansprüche an die Rechenkapazität. In der Folge könnte im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens höchstens eine geringe Anzahl von Szenarien simuliert werden. Eine systematische Betrachtung von weiteren Tunneltypen mit jeweils breiter Variation der Szenarien wäre mit vorhandenen Ressourcen nicht möglich.
- Wegen der Komplexität des Problems kann es selbst bei sehr detaillierter Modellierung zu inkonsistenten Ergebnissen kommen, z. B. durch die mangelnde Winkelgenauigkeit bei der Strahlungsmodellierung. Es entsteht dadurch ein hoher und schwer einschätzbarer Zeitbedarf für das Testen der Modelle und die Modellvalidierung.
- Eine solche Vorgehensweise hat zwar den Vorteil eines breit einsetzbaren Modells mit dem im Optimalfall beliebige Brandszenarien (im Ideal-

fall ein genau definiertes Fahrzeug) mit und ohne Wirkungen einer Brandbekämpfungsanlage untersucht werden könnten; dies ist aber für die Ziele des gegenständlichen Forschungsvorhabens gar nicht erforderlich, da ohnedies nur ganz bestimmte Szenarien für eine begrenzte Anzahl von weiteren Tunneltypen untersucht werden sollen. Des Weiteren ist ein solcher Zugang eher für die Nachrechnung eines realen Brandfalls (mit bekannter Ladung u. Ä.) als zur Berechnung des statistisch erwartbaren Risikos (durchschnittliche Szenarienentwicklung) anwendbar.

Aus diesen Gründen wird auf eine physikalische Pyrolysemodellierung verzichtet. Anstatt dessen wird der Naheffekt von BBA aus Großbrandversuchen im Runehamar Testtunnel 2008 [60] mit Wassernebelanlagen hergeleitet. Diese Brandversuche fanden unter Bedingungen statt, die mit den Modellbränden des vorliegenden Forschungsvorhabens vergleichbar sind. Bei verschiedenen Versuchen wurden sowohl die Brandrate $\dot{Q}(t)$ für ungestörte Brände als auch $\ddot{Q}(t)$ für Brände unter BBA-Einfluss ermittelt. Daraus lässt sich die Skalierungsfunktion $F(t) = \ddot{Q}(t)/\dot{Q}(t)$ bestimmen und auf die Modellbrände dieses Forschungsvorhabens übertragen (s. Bild 36).

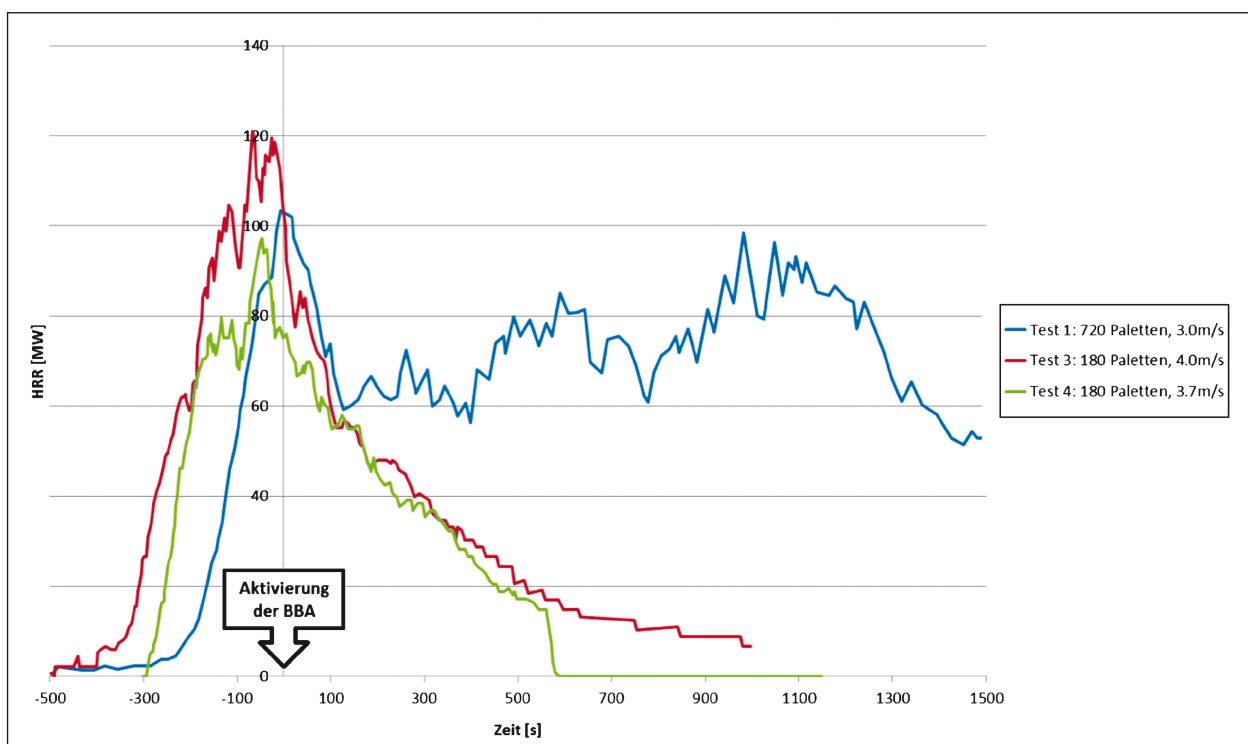


Bild 36: SINTEF-Großbrandversuche im Runehamar Testtunnel 2008 – Zeitliche Entwicklung der HRR nach Aktivierung der BBA

Basierend auf der Auswertung von Daten aus oben genannten Großbrandversuchen wurden die in Bild 37 dargestellten modifizierten Brandkurven für Modellbrände mit Aktivierung einer BBA hergeleitet. Wie in Tabelle 16 dargestellt, wird beim Brandmodell davon ausgegangen, dass sich der 5-, 30- bzw. 100- MW-Brand in 3, 5, bzw. 7 Minuten bis zur maximalen Brandleistung entwickelt.

Aufgrund der Erkenntnisse von Kapitel 2.4.2 werden die Daten abgedeckter Feststoffbrände als relevanter Ereignistyp herangezogen. Entsprechend den vorliegenden Daten wurden bei Aktivierung der BBA für alle drei Modellbrände eine mögliche Reduktion der maximalen Wärmefreisetzung um 50 % unterstellt, welche 120 Sekunden nach Aktivierung der BBA erreicht wird.

Bei den im Auftrag von LTA im Jahr 2012 durchgeführten Großbrandversuchen mit abgedeckten Feststoffbränden und Sprühflutanlagen konnten laut MELVIN et al. [38] ähnliche Wirkungen erzielt werden. Diese Großbrandversuche zeigten außerdem, dass der Aktivierungszeitpunkt der Anlage einen wesentlichen Einfluss auf die Brandentwicklung hat [11]. Aus diesem Grund wird diese Thematik im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse näher untersucht (s. Kapitel 8.3.3).

Generell ist darauf hinzuweisen, dass in Risikomodellen grundsätzlich mit stark vereinfachten Brand-

modellen gearbeitet und keine Differenzierungen hinsichtlich Brandart, Brandentwicklung oder Brandausbreitung getroffen wird, sodass diese Vorgehensweise den in Risikoanalysen bezüglich Brandmodellen üblichen Genauigkeitsansprüchen jedenfalls gerecht wird. Das resultierende Modell unterliegt freilich der Einschränkung, dass es nur für Brandszenarien bzw. Fragestellungen anwendbar ist, die den zugrundeliegenden Brandversuchen entsprechen und daher nicht auf Einzelereignisse (tatsächlich auftretende Brände), sondern nur auf den statistisch erwartbaren Mittelwert von Bränden dieser Klasse einsetzbar sind.

Modellierung im Hinblick auf die Fernwirkung

Unter der Fernwirkung von Brandbekämpfungsanlagen versteht man ihren Einfluss auf die Temperatur und Verrauchung im Tunnelquerschnitt.

Wesentliche Aspekte hierbei sind die Kühlung der Rauchgase sowie der durch die Einbringung von Tröpfchen resultierende Impuls (und damit einhergehende Zerstörung der Rauchsichtung). Hierfür ist eine möglichst realitätsnahe Modellierung der Düsenparameter erforderlich.

FDS bietet die Möglichkeit, die Interaktion zwischen Wassertropfen und den Strömungs- bzw. Temperaturverhältnissen in der Gasphase (inkl. Rauchpartikeln) abzubilden. Der Anwender hat die

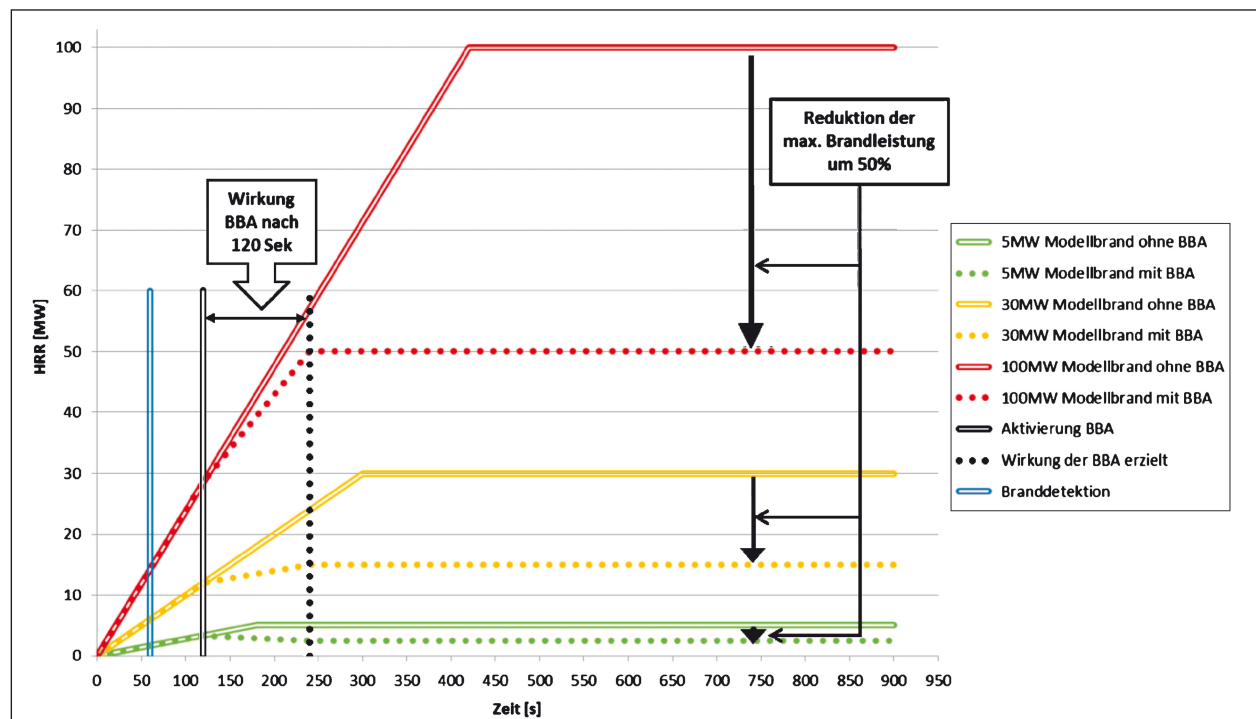


Bild 37: Wirkung der BBA auf die HRR bei abgedeckten Bränden

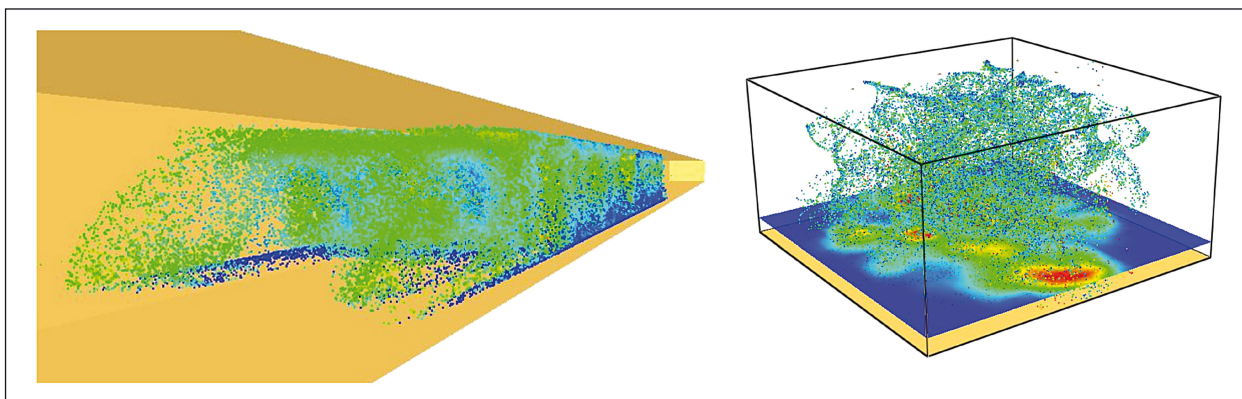


Bild 38: Beispielhafte Darstellung der Abbildung einer Wasserebel-BBA in FDS

Möglichkeit, die für eine realitätsnahe Abbildung der Interaktion notwendigen Parameter in Form von Verteilungsfunktion der Tröpfchengröße, Sprühmuster der Düsen und gesamter Durchflussrate vorzugeben. FDS bietet hier umfangreiche Eingabemöglichkeiten (s. Bild 38).

Die Tröpfchendurchmesserverteilung wird in FDS grundsätzlich als Kombination aus Lognormal-Verteilung (für $d \leq d_m$) und Rosin-Rammler-Verteilung (für $d > d_m$) definiert, wobei d_m der volumetrische Median-Durchmesser ist.

MAWHINNEY und TRELLES [37] weisen darauf hin, dass diese kombinierte Funktion der tatsächlichen Tröpfchenverteilung bei Hochdrucknebelanlagen nicht gerecht wird, speziell nicht bei den kleinsten auftretenden Tröpfchendurchmessern. Sie beziehen sich dabei auf Messungen des tatsächlichen 10-, 50- und 90-Prozentfraktils. Während MAWHINNEY und TRELLES FDS mit Hinblick auf die Verteilungsfunktion manipulierten, um eine rechtweisende Verteilung zu erhalten, wird für das vorliegende Forschungsvorhaben ein anderer, einfacherer Weg angestrebt:

Da die bei den Düsen der zu modellierenden Brandbekämpfungsanlage anstelle der 10-, 50- und 90-Prozentfraktile der Sauterdurchmesser bekannt ist, wird der Erwartungswert der Lognormal/Rosin-Rammler-Verteilung an diesen angepasst. Dadurch erhält man die korrekte totale Tröpfchenoberfläche der Sprühwolke, was für das thermodynamische Verhalten ausschlaggebend ist. (Anmerkung: Der Sauterdurchmesser ist der Durchmesser eines kugelförmigen Tröpfchens, bei dem das Tröpfchen dasselbe Verhältnis Volumen zu Oberfläche wie die gesamte Sprühnebelwolke aufweist).

Parametrisiert man die Lognormal/Rosin-Rammler-Funktion mit Hinblick auf den Sauterdurchmesser,

erhält man eine repräsentative Darstellung des Verhältnisses zwischen gesamtem Tropfendurchmesser und gesamter Tropfenoberfläche.

8.2 Ergebnisse der Bewertung der Wirksamkeit von BBA auf Basis des Risikomodells

8.2.1 Relevanz des Brandrisikos im Vergleich zum Gesamtrisiko

Grundsätzlich setzt sich in der Risikoanalysemethode gemäß Forschungsvorhaben FE 03.378/2004/FRB das Gesamtrisiko aus den Szenariotypen „Kollision (ohne Brand)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“ zusammen. Eine BBA hat nur Einfluss auf das Brandrisiko. Der Anteil des Kollisionsrisikos am Gesamtrisiko ist vom Tunneltyp abhängig (Gegenverkehrs-, bzw. Richtungsverkehrstunnel) und ist daher innerhalb der Varianten je modelliertem Tunneltyp konstant.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass bei praktisch allen modellierten Tunneltypen sowohl der Absolutwert des Brandrisikos als auch der Anteil des Brandrisikos am Gesamtrisiko sehr niedrig ist. Trotz erheblicher Schwankungen in Abhängigkeit von Tunneltyp und Lüftungssystem liegt der Anteil des Brandrisikos am Gesamtrisiko mit Ausnahme der Gegenverkehrstunnel mit Längslüftung lediglich in der Größenordnung von 1 % und teilweise auch deutlich darunter.

Dieses sehr niedrige absolute Brandrisiko kann auf folgende Ursachen zurückgeführt werden: Im Risikomodell werden die mittels Simulationen ermittelten Modellwerte für die Schadensausmaße bei Brand mithilfe von in der Methode vorgegebenen Parametern kalibriert und in derart modi-

fizierter Form in die Ereignisbäume eingefügt. Diese „Kalibrierungsparameter“ wurden im Zuge der Modellentwicklung mittels Expertenschätzung festgelegt und dienten auch dazu, konservative Annahmen sowohl im Bereich der Wahrscheinlichkeiten als auch bei der Schadensausmaßermittlung zu kompensieren, da sich ohne diese Kalibrierung viel zu hohe Brandrisiken ergeben würden. Im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde das Modell zur Schadensausmaßermittlung in einigen Punkten erheblich geschärft, wodurch konservativen Annahmen reduziert werden. Werden nun diese Ergebnisse mit den unveränderten Kalibrierungsfaktoren kombiniert, so ergibt sich ein tendenziell geringeres Brandrisiko. Der Forschungsnehmer ist daher der Ansicht, dass dieser Effekt bei der gegenständlichen Untersuchung tendenziell zu einer Unterschätzung der absoluten Größe des Brandrisikos führt. Um den Einfluss dieser Modellannahmen auf die absolute Größe des Brandrisikos abzuschätzen wurden im Zuge der Sensitivitätsanalyse auch Vergleichsrechnungen mit einem anderen Risikomodell, das nicht mit derartigen Kalibrierungsfaktoren arbeitet – vorgenommen (s. Kapitel 8.2.3). Der dargestellte Effekt hat allerdings keinen Einfluss auf die Bewertung der Wirksamkeit der BBA an sich, da hierfür das Brandrisiko alleine herangezogen wird und lediglich dessen relative Veränderungen bewertet werden.

8.2.2 Gegenverkehrstunnel

Tunnel mit Rauchabsaugung

Tabelle 17 zeigt das in der Risikoanalyse ermittelte Risiko für den Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung (Tunneltyp 1a) und dessen Varianten mit und ohne Aktivierung der BBA im Brandfall. Das Brandrisiko der Tunnelvarianten ist zusätzlich in Bild 39 dargestellt.

Generell zeigt sich, dass der Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung ein sehr geringes absolutes Brandrisiko aufweist. Durch die bei Gegenverkehrstunneln geringe initiale Längsströmungsgeschwin-

digkeit breiten sich einerseits die Brandgase langsam im Tunnel aus. Durch die schnelle Detektierung des Brandes und Wirksamwerden der Lüftung (z. B. 30-MW-Modellbrand hat nach 120 s erst 12-MW-Brandleistung erreicht) können die Brandgase sehr schnell und effizient abgesaugt werden, sodass die Verrauchung auf einen relativ kurzen Abschnitt des Tunnels begrenzt werden kann und dadurch auf beiden Seiten des Brandereignisses kaum Verkehrsteilnehmer zu Schaden kommen.

Bild 39 zeigt, dass sich das Risiko für das Szenario Brand durch die Aktivierung der BBA im Tunnel erhöht. Die Auswertung der Sichttrübung in Bild 40 verdeutlicht den negativen Effekt der BBA in diesem spezifischen Fall. Aus der Vielzahl an untersuchten Szenarien wurde das eines 30-MW-Brandes ausgewählt, da aus diesem spezifischen Szenario ein Großteil des Brandrisikos abstammt.

Dabei wurde der lineare Extinktionskoeffizient (Sichttrübung) an zwei Orten im Tunnel in einer Höhe von 1,60 m ausgewertet und die Variante mit und ohne Aktivierung der BBA verglichen. Die Messpunkte wurden derart gewählt, dass sich ein Messpunkt innerhalb und einer außerhalb des Bereiches der aktivierten BBA befindet (s. Bild 41).

Die Auswertung der Sichttrübung zeigt eindeutig, dass sich stromabwärts die Sicht im Bereich der Wassernebelanlage (RA_BBA_+25m) wesentlich verschlechtert. Der Brandrauch, der sich ohne Aktivierung der BBA an der Tunneldecke befinden würde, wird nun durch den eingebrachten Wassernebel nach unten gedrückt. Dadurch können kritische Schadstoffkonzentrationen überschritten werden, wodurch sich die Gefährdung von Personen, die sich in diesem Bereich aufhalten, erhöhen kann. Der gleiche Effekt, wenngleich deutlich abgeschwächt, ist auch bei der zweiten Messstelle außerhalb des Wirkungsbereichs der BBA festzustellen. Zwischen dem Messpunkt in 75 m Abstand (RA_BBA_+75) und dem Brandort befindet sich eine Abzugsöffnung, an der ein Drittel des gesamten Volumens und damit ein Großteil der entstehenden Brandgase aus dem Tunnel absaugt wird.

Tunnelvariante		Risiko Kollision	Risiko Brand	Gesamtrisiko
Tunneltyp 1a GV_RA_30mw_300m	ohne BBA	7,61E-02	1,58E-04	7,63E-02
	mit BBA	7,61E-02	1,04E-03	7,72E-02
T1a-Variante 1 GV_RA_30mw_400m	ohne BBA	7,61E-02	1,59E-04	7,63E-02
	mit BBA	7,61E-02	1,05E-03	7,72E-02

Tab. 17: Risikoerwartungswerte für Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung

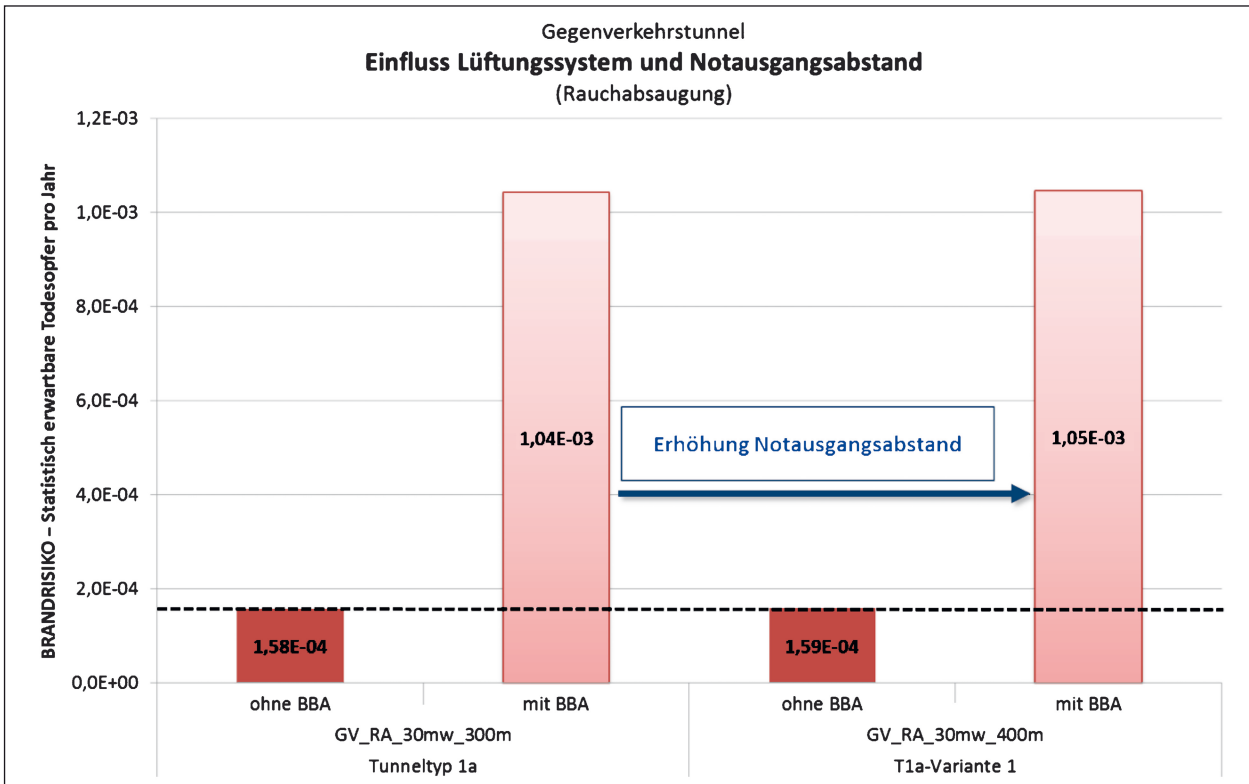


Bild 39: Brandrisiko für Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung

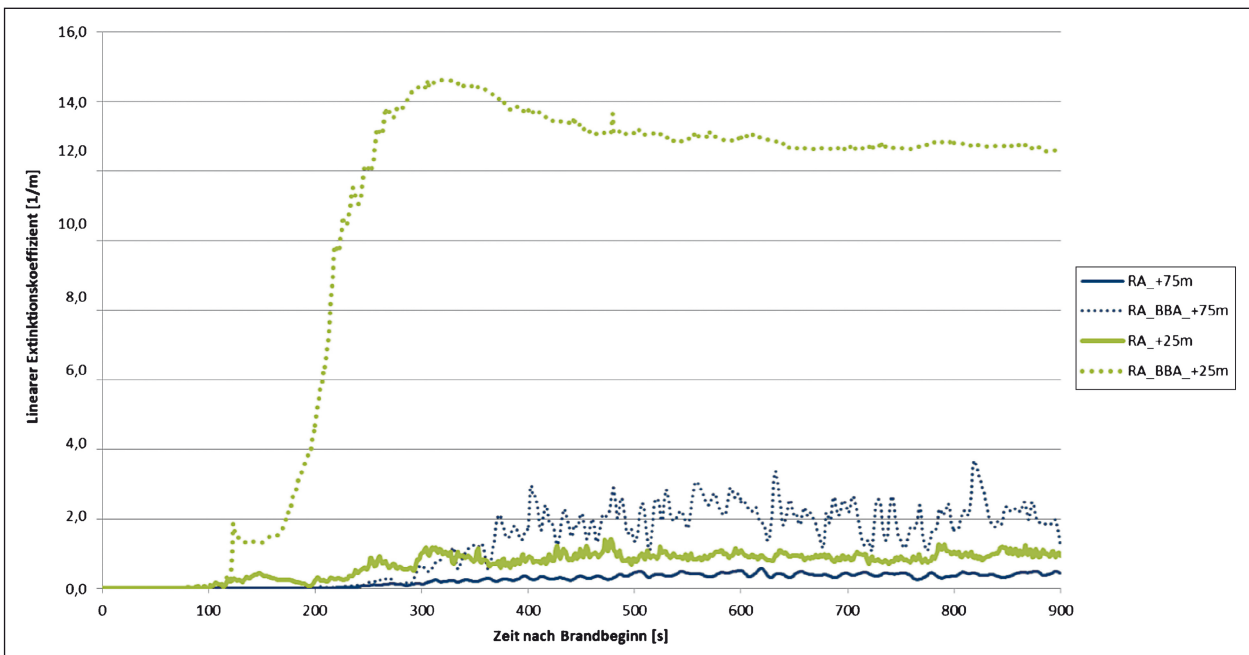


Bild 40: Gegenverkehrstunnel – Einfluss der BBA auf die Sichttrübung bei Rauchabsaugung am Beispiel eines 30-MW-Brandes

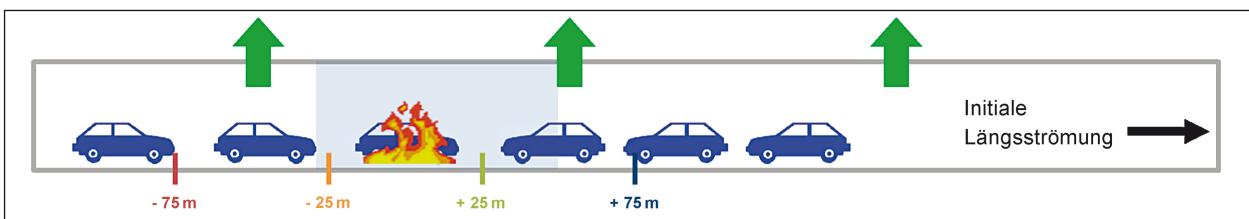


Bild 41: Schematische Darstellung der Messpunkte im Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung im Ereignisfall

Infolge der geringen Initialgeschwindigkeit erfolgt vor dem Wirksamwerden der Rauchabsaugung nur eine begrenzte horizontale Ausbreitung des Rauches (Rauch verbleibt zum Großteil im unmittelbaren Absaugbereich). Die Rauchabsaugung erreicht die maximale Absaugleistung vor der maximalen Brandleistung des Brandes und kann alleine bereits das Brandrisiko effizient reduzieren. Die Aktivierung der BBA wirkt in diesem Bereich der Rauchabsaugung entgegen, da sie die Rauchgase, weg von den in den Firsten gelegenen Absaugöffnungen, nach unten drückt.

Tunnel mit mechanischer Längslüftung

Tabelle 18 zeigt das in der Risikoanalyse ermittelte Risiko für den Gegenverkehrstunnel mit mecha-

nischer Längslüftung (Tunneltyp 1b) und dessen Varianten mit und ohne Aktivierung der BBA im Brandfall. Das Brandrisiko der Tunnelvarianten ist zusätzlich in Bild 42 dargestellt.

Der Tunneltyp 1b und dessen Varianten sind mit einer mechanischen Längslüftung ausgestattet. Alle diese Tunnel sind Gegenverkehrstunnel, daher befinden sich im Brandfall auf beiden Seiten des Brandortes Verkehrsteilnehmer, die den Tunnel nicht mehr per KFZ (Freifahren) verlassen können. Die Brandgase werden im Ereignisfall durch Aktivierung der Längslüftung einseitig vom Brandort in Richtung der initialen Längsströmungsrichtung abgetrieben. Dadurch wird ein relativ langer Tunnelabschnitt verraucht und es befinden sich im Vergleich zu den Tunneln mit Rauchabsaugung mehr

Tunnelvariante		Risiko Kollision	Risiko Brand	Gesamtrisiko
Tunneltyp 1b GV_LL_30mw_300m	ohne BBA	7,61E-02	4,66E-03	8,08E-02
	mit BBA	7,61E-02	2,79E-03	7,89E-02
T1b-Variante 1 GV_LL_30mw_200m	ohne BBA	7,61E-02	2,24E-03	7,84E-02
	mit BBA	7,61E-02	1,06E-03	7,72E-02
T1b-Variante 2 GV_LL_30mw_400m	ohne BBA	7,61E-02	6,60E-03	8,27E-02
	mit BBA	7,61E-02	4,75E-03	8,09E-02

Tab. 18: Risikoerwartungswerte für Gegenverkehrstunnel mit mech. Längslüftung

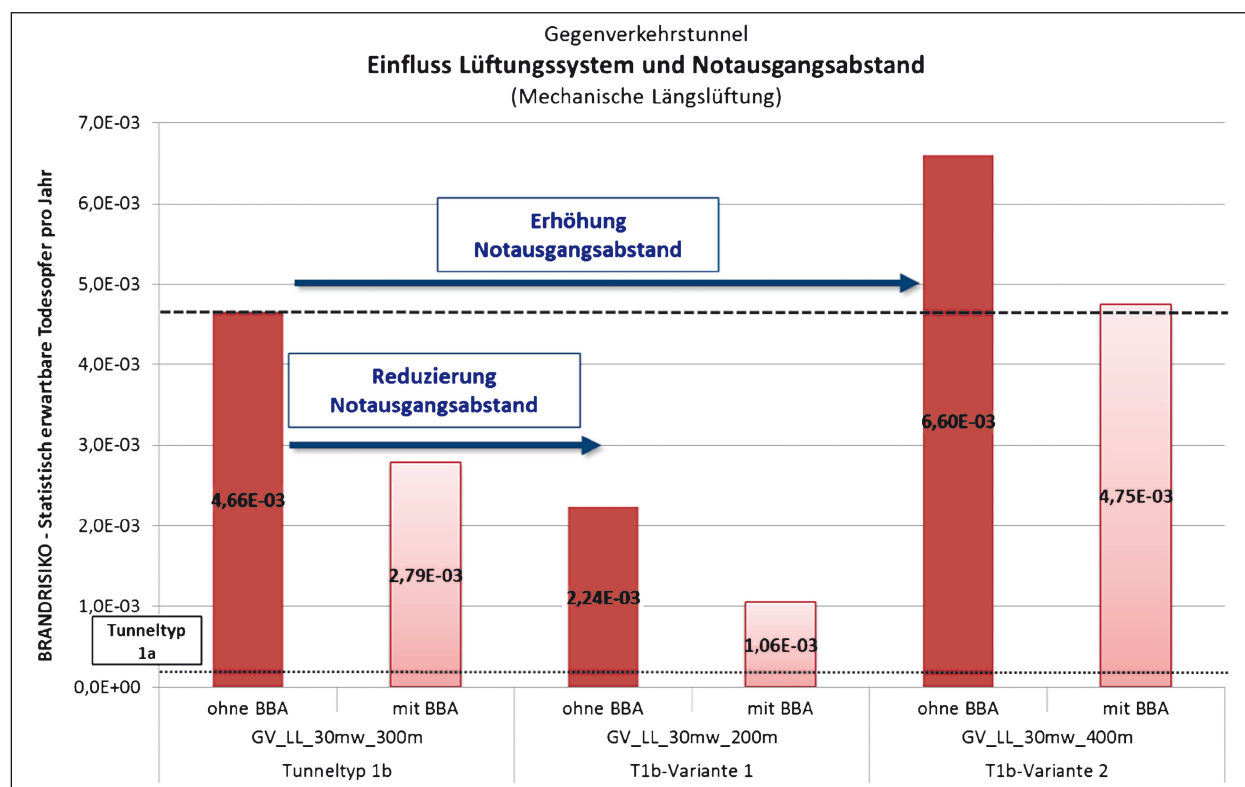


Bild 42: Brandrisiko für Gegenverkehrstunnel mit mech. Längslüftung

Personen im verrauchten Bereich. Dadurch ergibt sich beim Gegenverkehrstunnel mit mechanischer Längslüftung ein deutlich höheres Brandrisiko. In Bild 42 ist auch deutlich der Einfluss der Fluchtweglänge auf das Brandrisiko zu erkennen.

Bei allen modellierten Tunnel des Typs 1b ist eine eindeutig risikoreduzierende Wirkung der Brandbekämpfungsanlage zu erkennen (Abnahmen in der Größenordnung von 30-50 %), wobei die Wirkung der BBA mit abnehmender Fluchtweglänge zunimmt. Ein Vergleich mit dem Risikoreferenzwert der Variante MT1a (Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung) zeigt allerdings auch eindeutig, dass die Wirkung der Rauchabsaugung durch Einsatz einer BBA bei einem längsgelüfteten Tunnel nicht kompensiert werden kann.

8.2.3 Richtungsverkehrstunnel

Bei Richtungsverkehrstunneln wird unterschieden zwischen Tunneln mit ausnahmsweise stockendem Verkehr und dadurch geringer Stauegefahr sowie Tunneln mit täglich stockendem Verkehr und entsprechender Staueigung.

Tunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr

Tabelle 19 zeigt das in der Risikoanalyse ermittelte Risiko für den Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr (Tunneltyp 2a) und dessen Varianten mit und ohne Aktivierung der BBA im Brandfall. Das Brandrisiko der Tunnelvarianten ist zusätzlich in Bild 43 dargestellt.

Tunnelvariante		Risiko Kollision	Risiko Brand	Gesamtrisiko
Tunneltyp 2a RV_f_LL_100mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	5,35E-05	8,42E-02
	mit BBA	8,41E-02	1,64E-06	8,41E-02
T2a-Variante 1 RV_f_LL_30mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	8,05E-05	8,42E-02
	mit BBA	8,41E-02	6,25E-06	8,41E-02
T2a-Variante 2 RV_f_LL_30mw_400m	ohne BBA	8,41E-02	1,28E-04	8,43E-02
	mit BBA	8,41E-02	1,71E-05	8,42E-02

Tab. 19: Risikoerwartungswerte für Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr

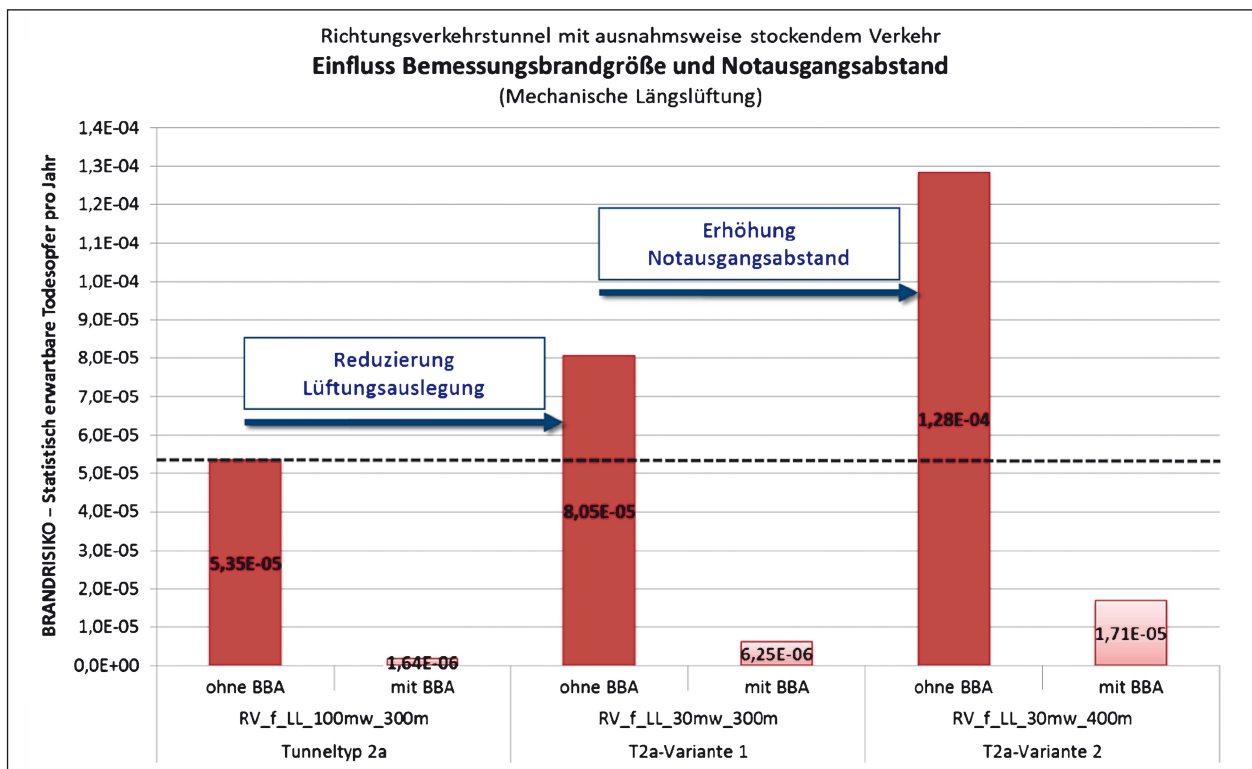


Bild 43: Brandrisiko für Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr

In einem Richtungsverkehrstunnel mit geringer Staugefahr (30 Stautunden pro Jahr), befinden sich im Normalfall keine Verkehrsteilnehmer im Bereich der sich ausbreitenden Rauchgase. Die stehenden Fahrzeuge befinden sich stromaufwärts des Brandortes und der Brandrauch wird in Strömungsrichtung mit kritischer Geschwindigkeit (je nach Bemessungsbrandleistung und Tunnelquerschnitt 2,5 bis 3,3 m/s) aus dem Tunnel geblasen. Dadurch weist der Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr geringste Brandrisiko aller Tunneltypen auf (Größenordnung: 1 Promille des Gesamtrisikos). In Bild 43 ist weiters ein deutlicher Einfluss sowohl der Lüftungsauslegung als auch der Fluchtweglänge auf das Brandrisiko zu erkennen.

Durch die Aktivierung der BBA wird das ohnehin sehr geringe Brandrisiko weiter signifikant reduziert, was darauf zurückgeführt werden kann, dass durch die BBA die Brandleistung verringert wird und infolgedessen in jenen Bereichen, wo sich Personen befinden, kaum mehr gesundheitsbedrohliche Wirkungen zu erwarten sind.

Tunnel mit täglich stockendem Verkehr

Im Gegensatz zu einem Tunnel mit geringer Staugefahr, können sich beim Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr (Annahme: 500 Stautunden pro Jahr; 5,7 % der Gesamtbetriebsstunden) ähnlich wie beim Gegenverkehrstunnel Fahrzeuge häufiger auf beiden Seiten des Brandortes befinden.

Tunnel mit Rauchabsaugung

Tabelle 20 zeigt das in der Risikoanalyse ermittelte Risiko für den Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und Rauchabsaugung (Tunneltyp 2b) und dessen Varianten mit und ohne Aktivierung der BBA im Brandfall. Das Brandrisiko der Tunnelvarianten ist zusätzlich in Bild 44 dargestellt.

Generell zeigt sich, dass der Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und Rauchabsaugung ein ähnlich geringes Brandrisiko aufweist wie der Richtungsverkehrstunnel mit ausnahmsweise stockendem Verkehr und Längslüftung. Die Ergebnisse zeigen, dass das aus dem zusätzlichen Stau resultierende Brandrisiko durch die Rauchabsaugung weitgehend kompensiert werden kann. In Bild 44 ist weiters ein deutlicher Einfluss sowohl der Lüftungsauslegung als auch der Fluchtweglänge auf das Brandrisiko zu erkennen.

In allen Fällen bewirkt der Einsatz der BBA eine Risikominderung, die allerdings wesentlich weniger signifikant ist als bei den Tunneltypen mit Längslüftung. Dies liegt daran, dass, wie schon beim Gegenverkehrstunnel mit Rauchabsaugung (Tunneltyp 1a) erläutert, die Wirkung der BBA die Wirkung der Rauchabsaugung negativ beeinflusst. Dies zeigt sich auch daran, dass die risikomindernde Wirkung der BBA bei einer auf 100 MW ausgelegten Rauchabsaugung deutlich geringer ist als bei einer nur auf 30 MW ausgelegten Rauchabsaugung (vergleiche Tunneltyp 2b mit Tunneltyp 2b-Variante 2 bzw. Tunneltyp 2b-Variante 1 mit Tunneltyp 2b Variante 3). Das heißt, je leistungsfähiger und effizienter die Rauchabsaugung umso ungünstiger wirkt der zusätzliche Einsatz einer BBA.

Tunnelvariante		Risiko Kollision	Risiko Brand	Gesamtrisiko
Tunneltyp 2b RV_s_RA_100mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	7,87E-05	8,42E-02
	mit BBA	8,41E-02	6,39E-05	8,42E-02
T2b-Variante 1 RV_s_RA_100mw_400m	ohne BBA	8,41E-02	1,17E-04	8,43E-02
	mit BBA	8,41E-02	6,48E-05	8,42E-02
T2b-Variante 2 RV_s_RA_30mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	9,33E-05	8,42E-02
	mit BBA	8,41E-02	4,43E-05	8,42E-02
T2b-Variante 3 RV_s_RA_30mw_400m	ohne BBA	8,41E-02	1,54E-04	8,43E-02
	mit BBA	8,41E-02	4,50E-05	8,42E-02

Tab. 20: Risikowertungswerte für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und Rauchabsaugung

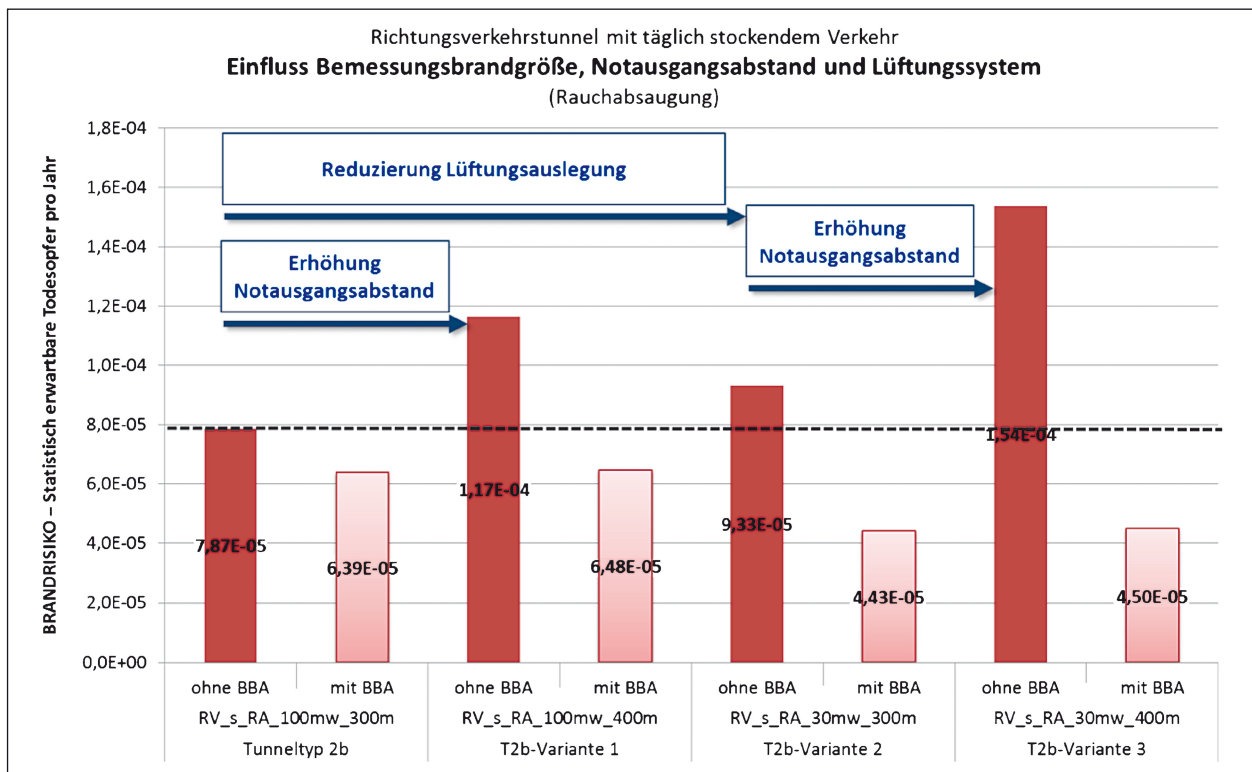


Bild 44: Brandrisiko für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und Rauchabsaugung

Tunnel mit mechanischer Längslüftung

Laut RABT ist für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr mit einer Länge von 1.200 m der Einsatz einer mechanischen Längslüftung nur nach Risikoanalyse erlaubt. Tabelle 21 zeigt das in der Risikoanalyse ermittelte Risiko für den Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und mechanischer Längslüftung (Tunneltyp 2c) und dessen Varianten mit und ohne Aktivierung der BBA im Brandfall. Das Brandrisiko der Tunnelvarianten ist zusätzlich in Bild 45 dargestellt.

Der Tunneltyp 2c und dessen Varianten sind mit einer mechanischen Längslüftung ausgestattet. Die Brandgase werden im Ereignisfall einseitig vom Brandort in Richtung der initialen Längsströmungsrichtung abgetrieben; dadurch wird ein relativ langer Tunnelabschnitt verraucht

Da in einem Richtungsverkehrstunnel im Stau-fall auch stromabwärts des Brandortes Fahrzeuge stehen, befinden sich im Vergleich zu den Tunneln mit Rauchabsaugung (bei denen die Verrauchung durch die Rauchabsaugung begrenzt

wird) mehr Personen im verrauchten Bereich. Dadurch ergibt sich in diesem Fall eine deutliche Erhöhung des Brandrisikos. In Bild 45 ist weiters ein deutlicher Einfluss sowohl der Lüftungsauslegung als auch der Fluchtweglänge auf das Brandrisiko zu erkennen.

Wie bei allen anderen Tunneltypen mit Längslüftung ist auch in diesem Fall durch den Einsatz der BBA eine signifikante Reduzierung des Brandrisikos erzielbar. Beispielsweise kann durch den Einsatz der BBA das Brandrisiko bei den Tunneltypen MT2c und MT2c-Variante 1 unter den Referenzwert des Tunneltyps MT2b (gleicher Notausgangsabstand, aber mit Rauchabsaugung) gedrückt werden. Dies bedeutet, dass in diesem konkreten Fall die Wirkung der Rauchabsaugung durch den Einsatz einer BBA kompensiert werden könnte.

Tunnelvariante		Risiko Kollision	Risiko Brand	Gesamtrisiko
Tunneltyp 2c RV_s_LL_100mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	5,47E-04	8,47E-02
	mit BBA	8,41E-02	1,67E-05	8,42E-02
T2c-Variante 1 RV_s_LL_30mw_300m	ohne BBA	8,41E-02	8,22E-04	8,50E-02
	mit BBA	8,41E-02	6,39E-05	8,42E-02
T2c-Variante 2 RV_s_LL_30mw_200m	ohne BBA	8,41E-02	2,51E-04	8,44E-02
	mit BBA	8,41E-02	3,95E-05	8,42E-02
T2c-Variante 3 RV_s_LL_30mw_400m	ohne BBA	8,41E-02	1,31E-03	8,54E-02
	mit BBA	8,41E-02	1,75E-04	8,43E-02

Tab. 21: Risikoerwartungswerte für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und mechanischer Längslüftung

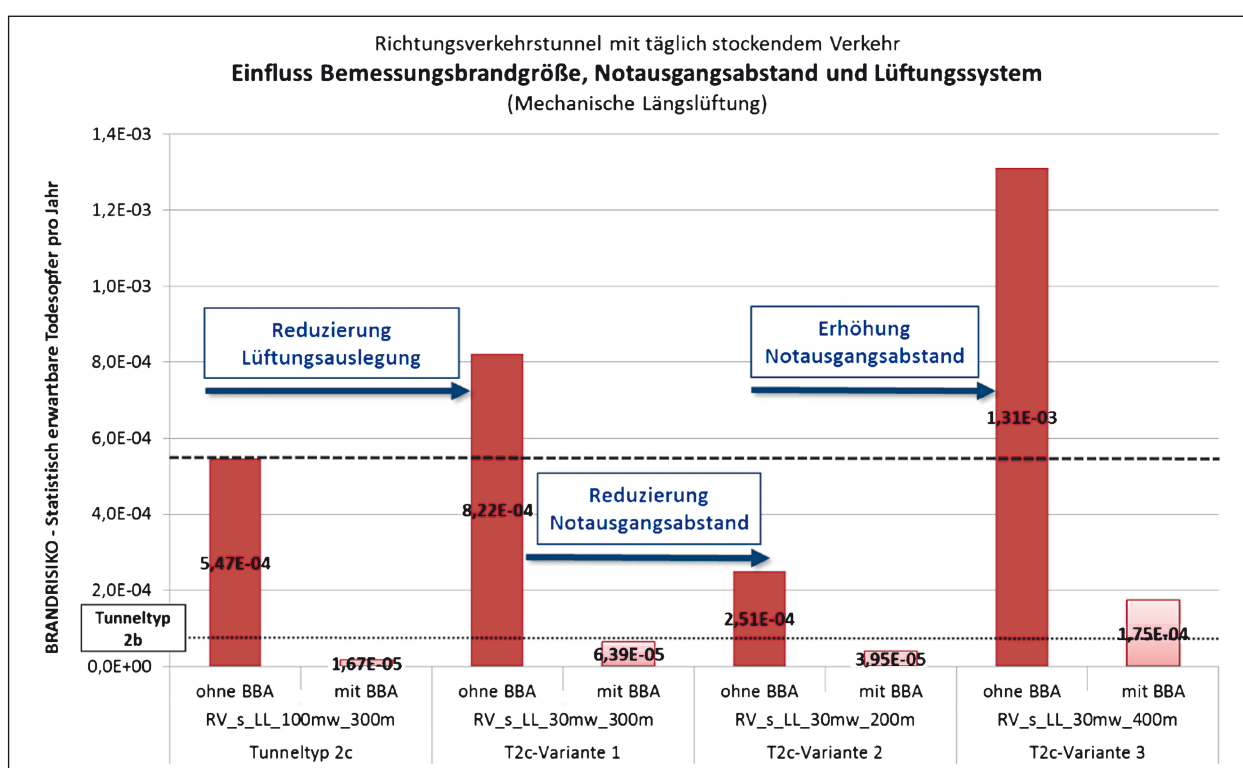


Bild 45: Risikoerwartungswerte für Richtungsverkehrstunnel mit täglich stockendem Verkehr und mechanischer Längslüftung

8.3 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse soll zeigen, wie sensitiv sich einzelne Parameter und Annahmen auf die Ergebnisse der Risikermittlung auswirken können. Daraus können sich Hinweise für die Interpretation der Ergebnisse ergeben.

8.3.1 Einfluss Risikomodell

Die in Kapitel 8.2 durchgeführte risikoanalytische Beurteilung wurden auf Basis des im Forschungs-

vorhaben FE 03.378/2004/FRB definierten Risikomodells durchgeführt. Zusätzlich wurde im Rahmen der Sensitivitätsanalyse auch eine Vergleichsrechnung mit einem anderen Risikomodell durchgeführt, bei dem die ermittelten Modellwerte ohne Kalibrierung direkt in einen Ereignisbaum übernommen werden. Für diesen Zweck wurde das weiterentwickelte österreichische Risikomodell „TuRisMo“ verwendet (Basis Begutachtungsentwurf der überarbeiteten RVS 09.03.11 vom Dezember 2013 [48]). Dieses Risikomodell verwendet einen anders strukturierten Ereignisbaum, in dem

die Brandwahrscheinlichkeiten auf Grundlage einer umfangreichen statistischen Auswertung realer Tunnelbrände entsprechend reduziert werden und dafür auf der Schadensausmaßseite auf Kalibrierungen verzichtet und stattdessen ein gewichteter Mittelwert aus einer größeren Anzahl simulierter Szenarien eingesetzt wird.

Mit diesem Modell wurde mit realitätsnahen Annahmen für die gleichen Modellierten Tunneltypen im Schnitt um einen Faktor 40 höhere Brandrisiken ermittelt, wobei dieses Modell tendenziell konservative Ergebnisse liefert. Diese Ergebnisse bestätigen jedoch die in Kapitel 8.2 erfolgte Einschätzung, dass die in der gegenständlichen Untersuchung ermittelten Absolutwerte des Brandrisikos tendenziell eher niedrig sind.

8.3.2 Einfluss einer Abdeckung der Brandlast auf die Wirksamkeit einer BBA

Brandversuche haben gezeigt, dass die Abdeckung der Brandlast erheblichen Einfluss auf die Wirksamkeit von BBA haben kann. In der Realität ist in der Regel mit abgedeckten Bränden zu rechnen, deshalb wurde auch bei der Festlegung der Modellannahmen von abgedeckten Bränden ausgegangen (s. Kapitel 8.1.4).

Im Zuge der Sensitivitätsuntersuchung wird nun überprüft inwieweit die Abdeckung der Brandlast Einfluss auf die Wirksamkeit der BBA haben kann, indem auch nicht abgedeckte Brände untersucht wurden. Während bei abgedeckten Bränden das Löschmittel das Brandgut nur schwer erreichen kann, was die Wirksamkeit beeinträchtigt (z. B. MELVIN [38]), ist bei nicht abgedeckten Bränden das Brandgut unmittelbar dem Löschmittel ausgesetzt, was die Wirksamkeit erhöht. Diese Effekte wurden folgendermaßen im Risikomodell abgebildet: Der BBA wird einerseits eine raschere Wirkung unterstellt. Anstatt nach 120 Sekunden tritt die Wirkung der Anlage bereits nach 60 Sekunden, also der Hälfte der Zeit, ein. Andererseits wird die maximale Brandleistung aller drei Modellbrände auf 30 % der Brandlast reduziert. Dadurch ergeben sich die in Bild 46 dargestellten adaptierten Modellbrandkurven nach Aktivierung der BBA.

Die Sensitivitätsanalyse mit modifizierten Brandkurven für nicht abgedeckte Brände wurde für zwei ausgewählte Tunneltypvarianten – jeweils ein Richtungsverkehrs- und ein Gegenverkehrstunnel – mit aktivierter BBA durchgeführt.

Bild 47 zeigt das jeweilige Brandrisiko der beiden modellierten Varianten mit, bzw. ohne Abdeckung des Brandgutes am Fahrzeug.

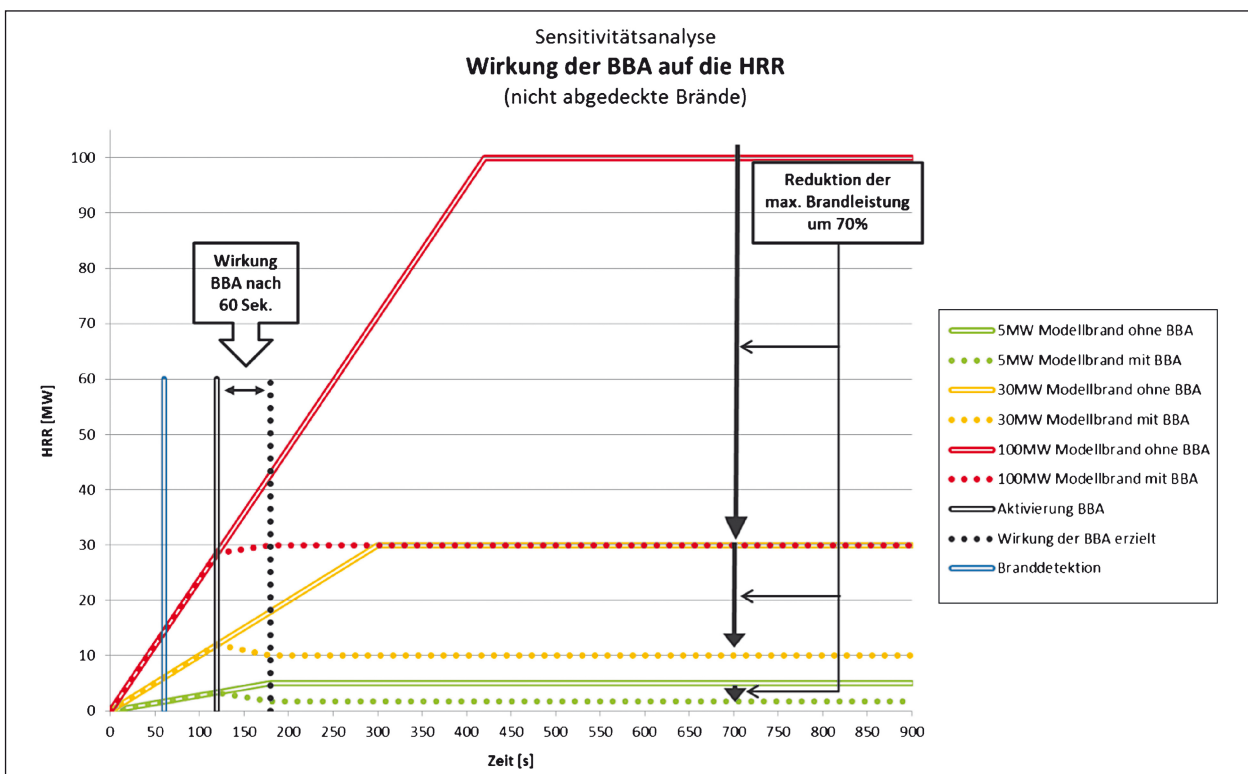


Bild 46: Wirkung der BBA auf die HRR bei nicht abgedeckten Bränden

Die Ergebnisse der Risikoermittlung zeigen, dass bei beiden modellierten Varianten (einem Richtungsverkehrstunnel mit Rauchabsaugung, und einem Gegenverkehrstunnel mit Längslüftung), eine Reduktion des Brandrisikos infolge dieser Veränderungen zu beobachten ist.

Im direkten Vergleich beider Varianten ist bei der Variante mit mechanischer Längslüftung eine größere Reduktion des Brandrisikos zu erkennen, wobei das absolute Risiko der Variante mit Rauchabsaugung wesentlich kleiner ist als das der Variante mit Längslüftung. Die Rauchabsaugung ist in diesem Fall bereits sehr effektiv, sodass die Änderung der Brandkurve weniger Einfluss hat als bei einer mechanischen Längslüftung.

Grundsätzlich kann man aufgrund dieser Ergebnisse feststellen, dass das Brandrisiko relativ sensitiv auf eine Veränderung hinsichtlich der Annahmen bzgl. der Wirkungen der BBA auf die Brandentwicklung (Unterdrückung des Pyrolyseprozesses) reagiert. Da in der Praxis eine Vielzahl an unterschiedlichen Situationen bzgl. der Zugänglichkeit des Brandherdes für das Löschmittels auftreten kann, ist davon auszugehen, dass die Wirksamkeit einer BBA schon alleine aus diesem Aspekt heraus stark variieren kann.

8.3.3 Einfluss des Aktivierungszeitpunktes auf die Wirksamkeit einer BBA

Wie in Kapitel 6.3.1 erläutert, wurde bei der Modellierung der Tunneltypen ein aus der Praxis üblicher Wert von 60 Sekunden für die Zeitdauer von Branddetektion bis Aktivierung der BBA gewählt. Aus den Überlegungen in Kapitel 5 wurde abgeleitet, dass aus verschiedenen Gründen eine möglichst frühe Aktivierung einer BBA angestrebt werden soll. Bei den bisher stattgefundenen Großbrandversuchen wurde jedoch primär die Wirkung von BBA auf voll entwickelte Brände untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein späterer Aktivierungszeitpunkt gewählt.

Aus diesem Grund wurde in einer Sensitivitätsanalyse überprüft, welchen Einfluss eine späte Aktivierung (7 Minuten nach Branddetektion) auf das Brandrisiko aufweist. Dadurch dass spätestens 7 Minuten nach Brandentstehung alle 3 Modellbrände ihre maximale Brandleistung erreicht haben, sind diese zum Zeitpunkt der Aktivierung der BBA bereits voll entwickelt.

Für diesen Fall wurde die Wirkung der BBA folgendermaßen angenommen:

- Wirksamwerden der BBA beim 5-MW-Modellbrand nach 60 Sekunden und Reduktion der Brandleistung um 50 % auf 2,5 MW,

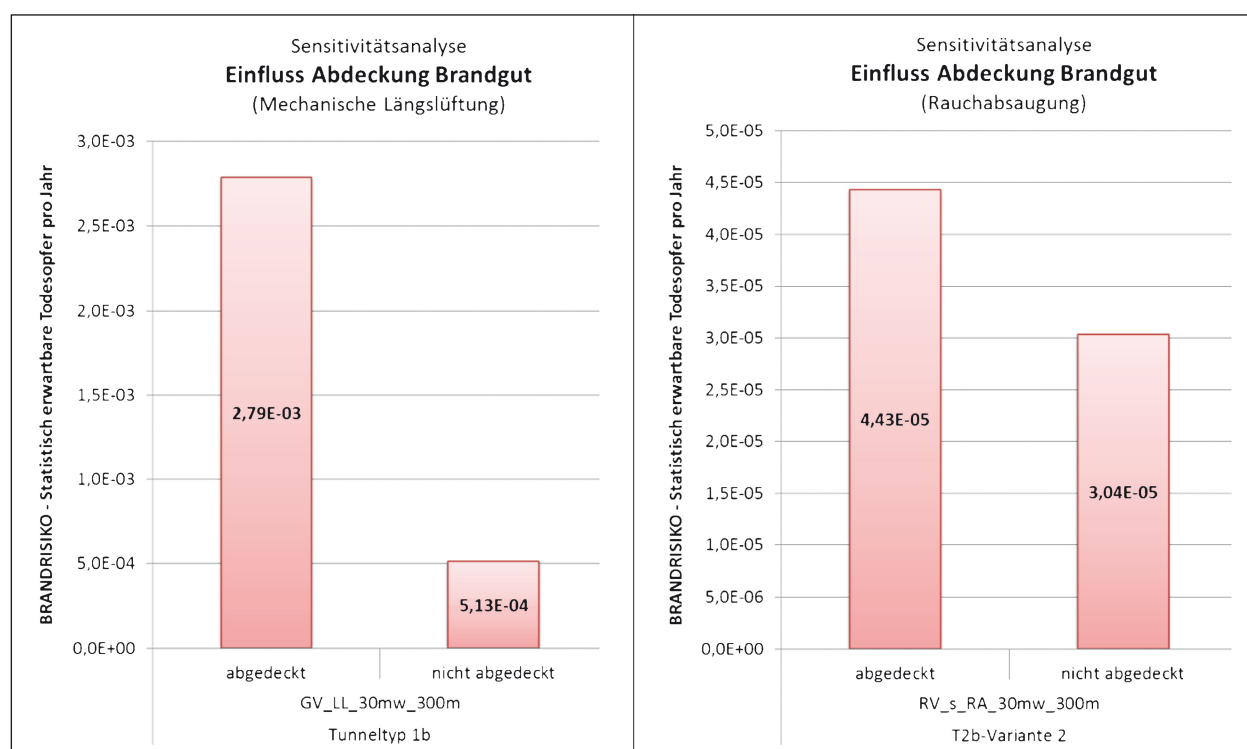


Bild 47: Sensitivitätsanalyse – Einfluss der Abdeckung des Brandgutes auf das Brandrisiko (links: Variante mit mechanischer Längslüftung; rechts: Variante mit Rauchabsaugung)

- Wirksamwerden der BBA beim 30-MW-Modellbrand nach 120 Sekunden und Reduktion der Brandleistung um 50 % auf 30 MW,
- Wirksamwerden der BBA bei 100-MW-Modellbrand nach 180 Sekunden und Reduktion der Brandleistung um 25 % auf 75 MW.

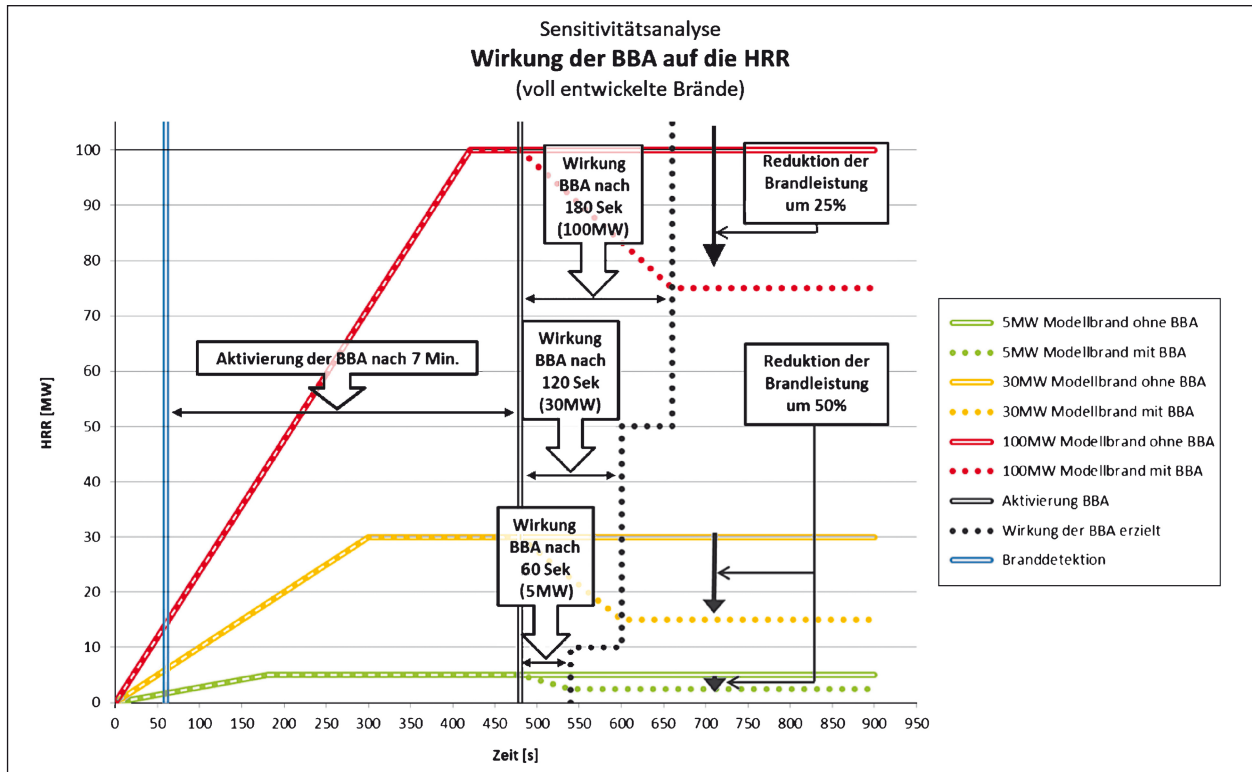


Bild 48: Wirkung der BBA auf die HRR bei voll entwickelten Bränden

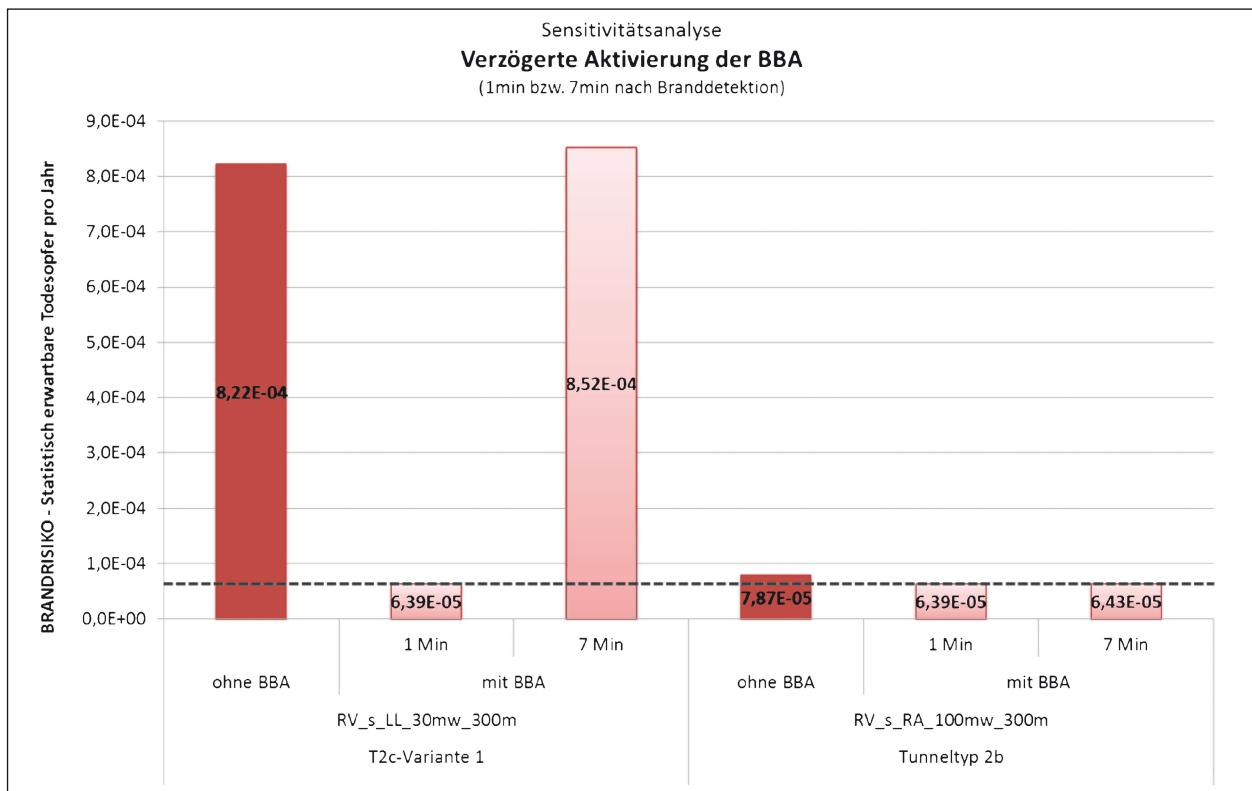


Bild 49: Sensitivitätsanalyse – Einfluss des Aktivierungszeitpunktes der BBA auf das Brandrisiko

Dadurch ergeben sich die in Bild 48 dargestellten adaptierten Modellbrandkurven.

Die Sensitivitätsanalyse mit diesen modifizierten Brandkurven für voll entwickelte Brände wurde für zwei ausgewählte Tunneltypvarianten – jeweils ein Tunnel mit Rauchabsaugung und ein Tunnel mit mechanischer Längslüftung – mit aktivierter BBA durchgeführt.

Bild 49 zeigt das jeweilige Brandrisiko der beiden Varianten mit Aktivierung nach 1, bzw. 7 Minuten nach Branddetektion.

Im Falle des Richtungsverkehrstunnels mit Längslüftung verzehnfacht sich das Brandrisiko und erreicht die gleiche Größenordnung wie ohne Aktivierung der BBA, wodurch die BBA durch die verzögerte Aktivierung praktisch wirkungslos wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt im Tunnel bereits Schadstoffkonzentrationen vorliegen, die ein Überleben nicht mehr ermöglichen. Dies unterstreicht die Tatsache, dass in der Praxis eine BBA so schnell wie möglich einsatzbereit sein und auch ausgelöst werden sollte.

Im Gegensatz dazu hat die verzögerte Aktivierung beim Tunnel mit Rauchabsaugung praktisch keine Auswirkungen auf das Brandrisiko. Es handelt sich hierbei um eine modellierte Tunnelvariante mit sehr

leistungsfähiger Rauchabsaugung, bei dem der Absolutwert des Brandrisikos auch ohne BBA sehr niedrig und die Wirkung der BBA eher gering ist (vergleiche Bild 44 sowie die Erläuterungen betreffend wechselseitiger Beeinflussung der Wirkungen von Rauchabsaugung und BBA). Wenn die Wirkung einer BBA von vornherein schon gering ist, haben Parameter, die die Wirkung der BBA beeinflussen, auch nur mehr wenig Effekt

8.4 Wirksamkeit von BBA in Hinblick auf das Schutzziel Bauwerksschutz

Neben dem Schutzziel Personenschutz, das im Rahmen der Bewertung der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen vorrangig betrachtet wird, ist auch der Bauwerksschutz ein wichtiges Motiv für Überlegungen zum Einbau einer automatischen Brandbekämpfungsanlage in einem Straßentunnel. Dies gilt beispielsweise dann, wenn entweder der Verfügbarkeit des Bauwerks hohe Bedeutung zukommt oder besondere örtliche Gegebenheiten (z. B. Überbauung oder Unterwassertunnel) einen besonderen Bauwerksschutz erfordern.

Große Tunnelbrände stellen eine ernsthafte Bedrohung für die Integrität der Bauwerksstruktur dar, da

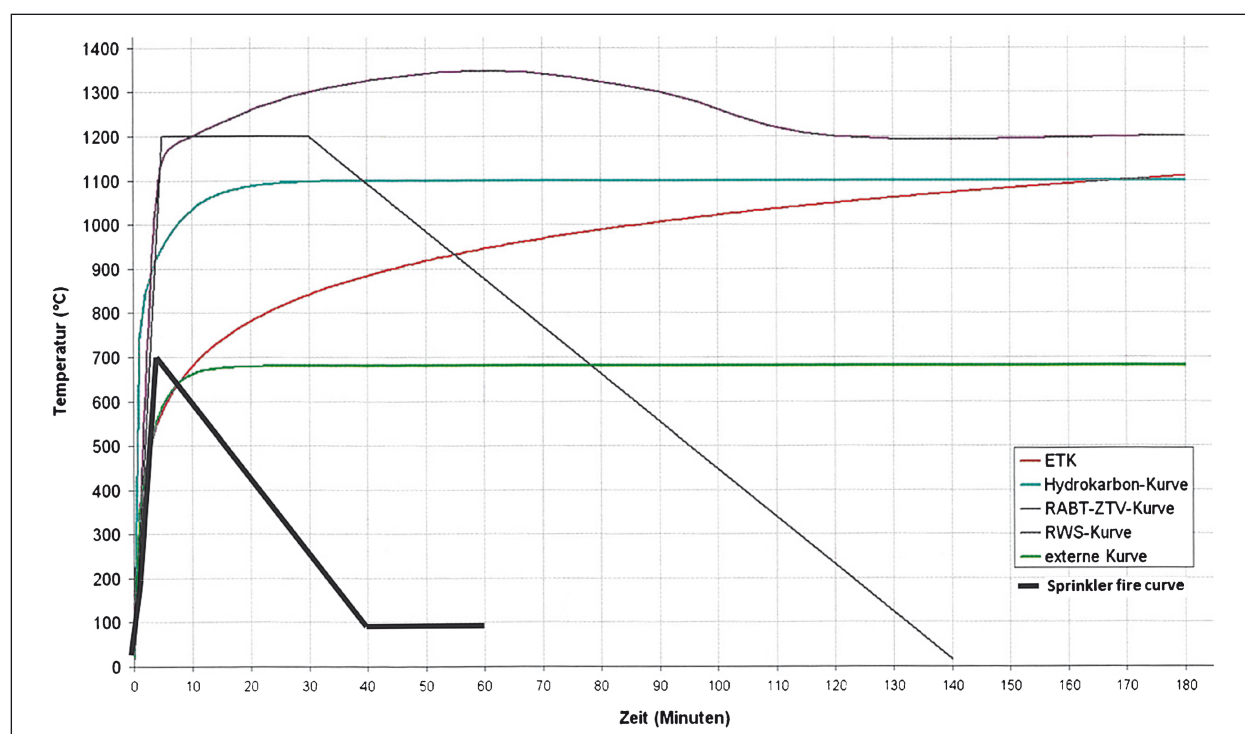


Bild 50: Zeit-Temperaturkurve bei Einsatz einer Sprühflutanlage im Vergleich zu Standard-Zeit-Temperaturkurven ohne Einsatz einer BBA [33, 69]

innerhalb weniger Minuten Temperaturen über 1.200 °C erreicht werden können. Zur Bewertung des Brandwiderstandes von Tunnelbauwerken werden in der Praxis verschiedene Zeit-Temperaturkurven verwendet, wie z. B. die RWS-Kurve, die HCM-Kurve oder die ZTV-ING Kurve [7]. Alle diese Kurven zeigen sehr hohe Temperaturen, die sehr rasch erreicht werden und über einen langen Zeitraum anhalten (s. Bild 50). Automatische Brandbekämpfungsanlagen sind sehr wirksam, was die Senkung der Temperaturen im Tunnelquerschnitt anbelangt. Daher liegt die Überlegung nahe, ob für die Bewertung des Bauwerksschutzes bei Einsatz einer BBA ein modifizierter Zeit-Temperaturverlauf zugrunde gelegt werden kann.

Diese Fragestellung wurde im Zuge der von LTA Singapur durchgeführten Brandversuche anhand von abgedeckten Feststoffbränden (228 Holz- und Plastikpaletten) mit Einsatz einer Sprühflutanlage untersucht (Applikationsrate 12 mm/min, Aktivierung 4 Minuten nach Branddetektion). Auf Basis der durchgeführten Temperaturmessungen wurde von LEMAIRE und CHEONG [33] eine Brandkurve definiert, die die Temperaturbelastung der Tunnelkonstruktion für derartige mit einer BBA (Sprühflutanlage) ausgerüstete Tunnel adäquat abbildet. Die Kurve (sprinkler fire curve) in Bild 50 wurde als Umhüllende sämtlicher im Nahbereich des Brandherdes bei den maßgebenden Brandversuchen gemessener Temperaturkurven entwickelt. Diese Kurve kann für Tunnel mit einer fachgerecht betriebenen, hoch zuverlässigen Sprühflutanlage, die die oben genannten Kriterien erfüllt, verwendet werden; ein Versagen der BBA ist bei dieser Kurve nicht berücksichtigt, ebenso kann es bei nicht abgedeckten Bränden lokal direkt über dem Brandherd auch zu höheren Temperaturen kommen, da die Kurve auf Basis von abgedeckten Bränden ermittelt wurde.

8.5 Stärken und Grenzen der Untersuchungen

Die durchgeführten Risikoberechnungen liefern aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der

- Auswirkungen der untersuchten sicherheitsrelevanten Modelttunnelparameter (Lüftungssystem, Lüftungsauslegung, Abstand der Notausgänge) sowie
- Aktivierung einer BBA

auf das Brandrisiko.

Das bestehende Risikomodell wurde für die gegenständliche Studie erheblich verfeinert, insbesondere was die realitätsnahe Abbildung wesentlicher Einflussparameter wie Brandentwicklung, zeitliche Entwicklung der Längsströmung im Tunnel (instationäre Simulation unter Berücksichtigung von Fahrzeugbewegungen, Strömungswiderständen, Hochfahren der Lüftung etc.) sowie der Reaktionen der betroffenen Personen unter Berücksichtigung der physiologischen Auswirkungen der Rauchgase (Einsatz eines Akkumulationsmodells) anlangt.

Risikoberechnungen mit komplexen Risikomodeln beinhalten jedoch zwangsläufig Unsicherheiten, die teilweise modellbedingt sind und teilweise aus Annahmen und unscharfen Datengrundlagen resultieren, und liefern daher auch unscharfe Ergebnisse. Daher sind relative Aussagen (Vergleich von Berechnungsergebnissen bei denen nur einzelne Parameter variiert werden und alle übrigen unverändert bleiben) zuverlässiger als absolute Aussagen.

In der gegenständlichen Studie wurden Unschärfen durch folgende Maßnahmen minimiert:

- Wo immer möglich (insbesondere wenn belastbare Daten verfügbar waren) wurden (deterministische) Punktschätzungen bzw. Annahmen durch eine Variation von Parametern mit entsprechender Erhöhung der Anzahl der simulierten Fälle ersetzt.
- Für einige im Untersuchungszusammenhang wesentliche Parameter wurden Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt.
- Die wesentlichen Ergebnisse und Aussagen beruhen größtenteils auf relativen Vergleichen.

Dennoch bleiben folgende Einschränkungen bestehen:

- Die Brandentwicklung wurde nicht variiert, sondern es wurde für jeden Modellbrand eine einzige fix vorgegebene zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsrates verwendet. In der Realität können sich Brände sehr unterschiedlich entwickeln (häufig deutlich langsamer als angenommen). Im Zusammenwirken mit dem Aktivierungszeitpunkt kann dies die Wirksamkeit einer BBA erheblich beeinflussen.
- Der Pyrolysevorgang selbst sowie die Wirkung der BBA auf diesen Prozess wurde nicht simuliert sondern mittels Analogieschlüssen aus

vorliegenden Ergebnissen von Großbrandversuchen abgeleitet.

- Die Simulationen wurden nur für einen Anlagentyp (Wassernebelanlage) und eine fix vorgegebene aus praktischen Anwendungsfällen abgeleitete Applikationsrate durchgeführt (keine „Bemessung“ der Anlage). Andere Anlagentypen (insbesondere Druckluftschaumanlagen) haben teilweise unterschiedliche Wirkungsmechanismen und daher sind die Ergebnisse nicht direkt auf andere Anlagentypen übertragbar.
- Die Untersuchung fokussiert auf die Entwicklung des Risikomodells und die Untersuchung einzelner Parameter anhand einer begrenzten Anzahl modellierter Tunnelvarianten. Eine umfassende und systematische Variation von Modellparametern war nicht Gegenstand der Untersuchung.

Aus all diesen Gründen sind die Ergebnisse nicht beliebig verallgemeinerbar, sind jedoch sehr wohl geeignet, allgemeingültige Tendenzen und Trends aufzuzeigen.

9 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich des Einsatzes automatischer Brandbekämpfungsanlagen ziehen:

- Dass automatische Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln eingesetzt, zuverlässig betrieben und wirksam zur Bekämpfung von Bränden verwendet werden können, ist sowohl durch eine große Anzahl von Realbrandversuchen als auch durch die bisherigen Praxiserfahrungen mit bereits realisierten Systemen nachgewiesen. Automatische Brandbekämpfungsanlagen verwenden durchwegs herkömmliche Technologien, die auch in einer Tunnelumgebung langfristig zuverlässig funktionieren, wenn sie unter Berücksichtigung der tunnelspezifischen Anforderungen ausgeführt und gewartet werden.
- Ein Großteil der in Betrieb befindlichen automatischen Brandbekämpfungsanlagen werden zum derzeitigen Stand mit dem Fokus des Bauwerksschutzes eingesetzt.

- Auch wenn sich die einzelnen BBA-Typen hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen durchaus erheblich unterscheiden, ist die Wirksamkeit grundsätzlich bei allen BBA-Typen gegeben, wenn sie unter Berücksichtigung der system-spezifischen Besonderheiten ausgelegt und geplant werden.
- Unterschiede zwischen den einzelnen BBA-Typen bestehen vor allem hinsichtlich der verfügbaren Versuchsdaten aus Realbrandversuchen. Die meisten Großversuche wurden mit Wassernebelanlagen durchgeführt, insofern liegen für diesen Anlagentyp die meisten Erfahrungen und die umfangreichsten Messwerte vor. Dieser Systemtyp wurde in Europa bislang auch am häufigsten in der Praxis eingesetzt (Erfahrungszeitraum bei den ältesten Anlagen etwa 8 Jahre) und es sind bislang in der Praxis keine wesentlichen Probleme aufgetreten. Allerdings wurden sie bislang lediglich bei einer geringen Anzahl kleiner (Pkw-)Brände auch tatsächlich für die Brandbekämpfung eingesetzt, sodass die diesbezügliche Praxiserfahrung nach wie vor sehr gering ist.
- Mit Sprühflutanlagen wurde im Jahr 2012 von LTA Singapur eine Serie von Großbrandversuchen durchgeführt, die im Prinzip ähnliche Ergebnisse wie die Versuche mit Wassernebelanlagen erbracht haben. Sprühflutanlagen sind im australischen und asiatischen Raum (Japan) seit vielen Jahren als Standardsicherheits-einrichtung für Straßentunnel im Einsatz und es sind auch mit diesen Systemen keine wesentlichen praktischen Probleme bekannt. Der einzige bislang dokumentierte Einsatz einer BBA bei einem großen Brandereignis ist der erfolgreiche Einsatz einer Sprühflutanlage beim Brand im australischen Burnley-Tunnel im Jahr 2007.
- Auch für die Druckluftschaumanlagen wurde die grundsätzliche Wirksamkeit mit einer Serie von Großbrandversuchen nachgewiesen, allerdings wurden für diese Tests andere Düsensysteme verwendet als sie bei den in der Praxis realisierten Projekten derzeit eingebaut werden (Rotoren anstelle von Sprühdüsen). Für diese Ausführung liegen bisher lediglich Erfahrungen aus Pkw-Bränden vor, die im Rahmen der Inbetriebnahme des jeweiligen Tunnels durchgeführt worden sind. Mit diesem System gibt es bislang auch die wenigsten praktischen Erfahrungen (in Betrieb befindet sich derzeit lediglich

ein Tunnel in Deutschland) und es liegen auch noch keine Informationen von realen Löschein-sätzen vor.

Die Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen wurde mittels Simulationsrechnungen näher untersucht und unter Einsatz eines Risikomodells bewertet. Für die Zwecke dieses Forschungsvorhabens wurde grundsätzlich das Risikomodell gem. Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB „Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln“ verwendet und hinsichtlich einiger Parameter modifiziert, um die im Rahmen des gegenständlichen Projektes untersuchten Aspekte realitätsnäher abbilden zu können. Die Ergebnisse weisen ein sehr geringes absolutes und Brandrisiko auf.

Den Simulationen wurde dabei eine Wassernebelanlage zugrunde gelegt. Weiter beziehen sich die folgenden Aussagen auf (meist abgedeckte) Feststoffbrände, die den in der Praxis dominierenden Ereignistyp darstellen.

Hinsichtlich der Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen können folgende Schlussfolgerungen zusammengefasst werden:

- Die Aktivierung einer korrekt geplanten BBA kann die Temperaturen bei einem Brand in einem Tunnel sehr wirkungsvoll reduzieren. Die Effekte auf die Temperaturentwicklung im Tunnel sind umfangreich durch zahlreiche Messdaten aus vielen Brandversuchen belegt, dies gilt ebenso für weitere infolge der Temperaturreduzierung zu erwartende positive Effekte wie die Erleichterung eines Löscheinsatzes, die Verhinderung der Brandausbreitung sowie den Schutz des Tunnelbauwerks und der Tunnelausrüstung vor übermäßiger Temperatureinwirkung.
- Für den Personenschutz sind jedoch neben den Temperatureinwirkungen vor allem die Rauchgaswirkungen auf den menschlichen Organismus von entscheidender Bedeutung. Wie sich die Aktivierung einer BBA auf die Schadstoffkonzentrationen im Abstrombereich auswirkt ist wesentlich weniger gut belegt. Die auftretenden Effekte sind gegenläufig: Einerseits erfolgt eine Reduktion der Schadstoffproduktion durch die Eindämmung der Brandentwicklung (Verringerung der HRR), andererseits wird durch den durch Aktivierung der Anlage ausgelösten vertikalen Impuls eine vertikale Durchmischung der Brandgase ausgelöst, die infolge der Rauchschichtung im Firstbereich befindlichen höheren

Rauchgaskonzentrationen in untere Bereiche des Tunnelquerschnitts befördert und damit in den Bereich, in dem sich Personen aufhalten. Es liegen Messungen von Brandversuchen vor, die eine Erhöhung der Schadstoffkonzentrationen im Gehbereich infolge Aktivierung einer BBA im Vergleich zum Fall ohne Aktivierung zeigen (s. Kapitel 3.5.1). Der gleiche Effekt konnte auch in den durchgeführten Simulationen nachgewiesen werden.

- Die durchgeführten Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass bzgl. Personenschutz eine Vielzahl von Parametern in einem komplexen Wechselspiel zusammenwirken und daher pauschale Aussagen nur bedingt möglich sind. Eine allgemeingültige Erkenntnis ist die, dass der Aktivierungszeitpunkt einer BBA bezogen auf die Phase der Brandentwicklung entscheidenden Einfluss hat. Wenn eine BBA in einer sehr frühen Phase der Brandentwicklung aktiviert wird, so kann man davon ausgehen, dass die weitere Brandentwicklung wirkungsvoll unterbunden wird. Geschieht dies bereits in einer Phase der Brandentwicklung, wenn die Schadstoffproduktion noch gering ist, so kann von einer sehr hohen Wirksamkeit der BBA in Bezug auf den Personenschutz ausgegangen werden. Erfolgt die Aktivierung hingegen zu einem Zeitpunkt, zu dem die Brandentwicklung bereits relativ weit fortgeschritten ist, dann überlagern die grundsätzlich positiven Effekte der BBA die oben dargestellten negativen Effekte, was die Wirksamkeit hinsichtlich Personenschutz beeinträchtigt.
- Die durchgeführten Simulationsrechnungen gehen einerseits von einer realistisch raschen Aktivierung der BBA, andererseits aber auch von einer relativ raschen Brandentwicklung aus. Unter diesen Bedingungen zeigt sich, dass bei Längslüftungssystemen sowohl bei Richtungs- wie auch bei Gegenverkehrstunneln eine hohe Risikoreduktion durch den Einsatz einer BBA erreicht werden kann. Schwieriger zu beurteilen ist die Wirksamkeit eines BBA-Einsatzes bei Vorhandensein einer Rauchabsaugung. Die Simulationsrechnungen liefern Hinweise, dass die Wirksamkeit der Rauchabsaugung durch die Aktivierung der BBA beeinträchtigt werden können. Rauchgase die sich oben im Firstbereich befinden und abgesaugt werden sollten, werden durch die BBA in tiefer liegende Querschnittsbereiche befördert. Weiter hat die

Entwicklung der Strömungsverhältnisse im Einzelfall Auswirkungen auf das Zusammenwirken von Rauchabsaugung und BBA.

- Aus den vorliegenden Ergebnissen ist ersichtlich, dass das Zusammenwirken zwischen BBA und dem Lüftungssystem komplexe Fragestellungen aufwirft, die auf Basis der vorliegenden Ergebnisse abschließend nicht beantwortet werden können. Vor diesem Hintergrund ist auch die Frage zu diskutieren, in welcher Hinsicht und in welchem Maße durch Einsatz einer BBA Kompensationsmöglichkeiten bei anderen Sicherheitssystemen (wie z. B. Wahl des Lüftungssystems oder Auslegung der Lüftung) gegeben sind. Grundsätzlich wird die Möglichkeit von Kompensation durch Einsatz einer BBA durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigt, da die durch die BBA erzielbare Reduktion des Brandrisikos in den meisten Fällen sehr hoch ist, allerdings spielen diesbezüglich (siehe oben) eine Reihe von Parametern eine Rolle (z. B. die Aktivierungsstrategie oder etwaige Wechselwirkungen mit dem Lüftungssystem), die mit dem Vorhandensein des Systems allein nicht genügend abgebildet sind. Deshalb kann die Frage der Kompensationsmöglichkeiten lediglich im Einzelfall unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Rahmenbedingungen anhand einer detaillierten Analyse geklärt werden. Weiter spielen bei der Frage der Kompensation neben Wirksamkeits- auch Wirtschaftlichkeitsaspekte eine wesentliche Rolle.
- Sowohl aufgrund der vorliegenden Versuchsergebnisse als auch auf Basis der durchgeführten Simulationsrechnungen erscheint eine möglichst rasche Aktivierung der Anlage im Brandfall sinnvoll, um eine möglichst hohe Wirksamkeit einer BBA zu gewährleisten. Da die Aktivierung der Anlage jedoch im betroffenen Tunnelabschnitt schlagartig und unerwartet zu einer starken Sichtbeeinträchtigung führt, muss vor Aktivierung der Verkehr im Tunnel angehalten werden. Es wird daher ein Aktivierungsprozedere als zweckmäßig angesehen, bei dem die BBA bei Auslösung eines Brandalarms zwar sofort hochgefahren, aber erst mit einer definierten Zeitverzögerung automatisch ausgelöst wird, um Zeit für die Verkehrsanhaltung zu gewinnen und auch dem Operator die Möglichkeit zu geben, in dieser Latenzzeit manuell zu intervenieren (entweder sofort auslösen oder die Auslösung zu stoppen bzw. zu verzögern).

Die Auswirkungen einer BBA auf die Tunnelbenutzer wurden mittels Probandenversuchen in virtueller Versuchsumgebung in einer CAVE untersucht. In der Versuchsanordnung wurden zwei Probandengruppen mit einem realistischen Brandszenario in einem Tunnel konfrontiert, wobei bei einer Versuchsgruppe zusätzlich zur Rauchausbreitung auch die Aktivierung einer Wassernebelanlage simuliert wurde. Das Verhalten beider Gruppen wurde danach ausgewertet und verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden durch eine Befragung ergänzt. Durch die gewählte Versuchsanordnung konnten zwar die optischen und akustischen Wirkungen einer BBA realitätsnah abgebildet werden, nicht jedoch deren haptische Wirkungen (Nässe, Kälte). Die durchgeführte Untersuchung konnte jedoch erste wichtige Erkenntnisse, wie sich eine BBA auf das Verhalten und Erleben von Tunnelnutzern auswirkt, liefern.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf das Verhalten der Tunnelbenutzer können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- In den Befragungen zeigte sich, dass ein Großteil der Probanden dem Einbau einer Brandbekämpfungsanlage positiv gegenübersteht. Trotz Unsicherheit über die Auswirkungen des Wassernebels, sehen alle Probanden einen positiven Nutzen der BBA für die Sicherheit im Tunnel.
- Die Probanden überschätzen deutlich die Anzahl der Tunnel, in denen eine BBA installiert ist. Die Mehrheit (64 %) ist der Meinung, dass eine BBA zur Standardausrüstung eines Straßentunnels gehört.
- Auffälligstes Ergebnis der Untersuchungen ist die Tatsache, dass sich keine signifikanten Unterschiede bzgl. des Ausstiegverhaltens sowie des Verhaltens bei der anschließenden Flucht zum Notausgang zwischen den beiden Probandengruppen (mit bzw. ohne Aktivierung der BBA) ergeben haben. Sowohl die Probanden mit Aktivierung als auch die ohne Aktivierung der BBA suchen als Fluchtziele die nächstgelegenen Sicherheitseinrichtungen auf, auch wenn diese für die Probanden mit aktivierter BBA im Einflussbereich des Wassernebels liegen. Auch verlassen in beiden Gruppen alle Probanden ihr Fahrzeug, wobei die Probanden mit aktivierter BBA im Durchschnitt etwas später aussteigen. Einschränkend ist zu bemerken, dass insbesondere dieses Ergebnis aus einer Simulations-

studie ohne die Simulation von Kälte und Nässe resultiert und nur eine spezifische Situation simuliert wurde. Eine Generalisierung der Ergebnisse sollte als nur mit großer Vorsicht vorgenommen werden.

- Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass der akustischen Aufforderung zur Flucht und der visuellen Fluchtwegkennzeichnung im Tunnel bei Einsatz von BBA verstärkte Bedeutung zukommt.
- Nach Aktivierung der BBA wurde von den Probanden überwiegend eine starke Sichteinschränkung wahrgenommen, wobei diese im Fahrzeug als stärker eingeschätzt wurde als außerhalb des Fahrzeuges. Entsprechend orientieren sich die Personen der Probandengruppe mit BBA bei ihrer Flucht verstärkt an der Tunnelwand.
- Zusätzliche Befunde wurden durch einen Vergleich der Ausstiegsposition gewonnen (innerhalb oder vor dem Einflussbereich der Wassernebelanlage). Probanden, die sich vor dem Wassernebel befinden, flüchten nicht in den Wassernebel hinein zu den nächstgelegenen Sicherheitseinrichtungen, sondern suchen weiter entfernte Sicherheitseinrichtungen in Richtung Einfahrtportal auf.
- Sowohl die Analyse des Verhaltens als auch die Befragungen konnten eine Reihe von Ansatzpunkten liefern, wie sich die Aktivierung einer BBA auf das menschliche Verhalten auswirken kann. Die Generalisierung der Untersuchungsergebnisse wird allerdings dadurch eingeschränkt, dass nur eine geringe Anzahl an Szenarien untersucht werden konnte und auf die Simulation von Nässe und Kälte verzichtet wurde. Die gefundenen Ergebnisse liefern aufgrund der Limitationen nur erste Anhaltspunkte dafür, dass die Aktivierung einer BBA in einem Straßentunnel das Verhalten der Tunnelnutzer nicht negativ beeinflusst, solange Teile der Infrastruktur des Tunnels auf die Aktivierung einer BBA abgestimmt werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei eine Durchsage, die Tunnelnutzer vor der Aktivierung der BBA zur Flucht auffordert und über die generelle Aktivierung der BBA informiert.

In der gegenständlichen Untersuchung hat sich bestätigt, dass der Einsatz von BBA als zusätzliches Sicherheitssystem in einem Straßentunnel

eine Fülle von sehr komplexen Fragestellungen aufwirft, die nicht vollumfänglich in der gegenständlichen Studie beantwortet werden können. Einerseits wurden Grundlagen und Tools entwickelt, mit denen weitere vertiefte Analysen und Parameterstudien effizient und mit überschaubarem Aufwand durchgeführt werden können. Andererseits zeigen die vorliegenden Ergebnisse Bedarf an solchen weiteren Untersuchungen auf.

Im Hinblick auf die Bewertung der Wirksamkeit wäre es zweckmäßig, die sehr sensitiven Zusammenhänge Brandentwicklung – Strömungsentwicklung im Tunnel – Aktivierungszeitpunkt der BBA mit weiteren Parameterstudien vertieft zu untersuchen und zu analysieren. In diesem Zusammenhang wäre es auch interessant, die Hinweise auf eine eher ungünstige Wirkung einer BBA im Zusammenhang mit einer Rauchabsaugung näher zu untersuchen.

Bisher wenig beleuchtet wurden – im Gegensatz zu den Temperaturwirkungen – auch die Effekte einer BBA auf die Verteilung und Konzentration von gesundheitsschädlichen Rauchgaskomponenten im Tunnel, die für die Bewertung der Effekte auf den Menschen aber von hoher Bedeutung sind. Zu dieser Fragestellung liegen auch relativ wenig verwertbare Messdaten aus Brandversuchen vor; insbesondere ist Frage nicht geklärt, ob und inwieweit es durch eine BBA zu Auswaschungseffekten kommt. Weiter sind auch Fragestellungen im Zusammenhang mit der Wirkung eines Einsatzes von BBA bei Unfällen mit Freisetzung von Gefahrgut ungeklärt.

Im Hinblick auf das menschliche Verhalten liefert die durchgeführte Untersuchung interessante und aussagekräftige Erkenntnisse über das Verhalten und Erleben von Personen unter dem Einfluss einer BBA. Interessant wäre aber die Untersuchung weiterer Szenarien. So ist unklar wie sich die Aktivierung einer BBA auswirkt, wenn Personen bereits außerhalb ihres Fahrzeugs auf der Flucht sind oder sich der nächste Notausgang in einem größeren Abstand zum Probanden befindet. Oder die Frage wie sich Autofahrer verhalten, wenn sie mit dem Fahrzeug auf eine bereits aktivierte BBA treffen. Auch eine Untersuchung unter Einwirkung von Kälte und Nässe könnte weitere wichtige Erkenntnisse zu ihrer Auswirkung auf das Fluchtverhalten liefern.

10 Literatur

- [1] ANDO et al. (1998): Gehgeschwindigkeiten als Funktion von Alter und Geschlecht, *Railway Research Review*
- [2] BIRBAUMER, N. et al. (2003): *Biologische Psychologie mit 48 Tabellen*. Berlin: Springer
- [3] BOER, L. C. (2002): Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel. Rapport TNO Human Factors
- [4] BRADLEY, M. M. & LANG, P. J. (1994): Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 25 (1), 49-59
- [5] BRANDT, A. & WIGHUS, R. (2006): SINTEF NBL, Real-scale Tests of Compressed Air Foam System in Runehamar Test Tunnel 2005. NBK F06105 – Restricted Report. July 2006
- [6] Bundesanstalt für Straßenwesen (2011): Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, B80
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen (2012): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5: Tunnelbau, Abschnitt 1 – Geschlossene Bauweise
- [8] CANTER, D.: *Fire and human behavior*. 2. ed 1990, London: David Fulton
- [9] CEA 4001 (2009): *Sprinkler Systems: Planning and Installation*
- [10] Cetu (2010): *Water Mists in Road Tunnels. State of knowledge and provisional assessment elements regarding their use*
- [11] CHEONG, M. K. et al. (2013): Heat release rates of heavy goods vehicle fires in tunnels. 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels. Barcelona. September 2013
- [12] Deutsches Institut für Normung (2008): DIN CEN/TS, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Feinsprüh-Löschanlagen – Planung und Einbau(14972). 2008-11
- [13] Deutsches Institut für Normung. DIN EN 2:2005-01 Brandklassen. Deutsche Fassung EN 2:1992 + A1:2004
- [14] DIX, A. (2011): *The Fatal Burnley-Tunnel Crashes Melbourne, Victoria, Australia. Expert Report for the Victorian Coroner*
- [15] ENDERLEIN, H. (2000): *Farbgestaltung, Wirkung der Farbe auf den Menschen*. Chemnitz: Arbeitswissenschaften Chemnitz TU
- [16] Europäische Kommission (2004): Richtlinie 2004/54/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz
- [17] EYSENCK, M. W. & CALVO, M. G. (1992): Anxiety and performance The processing efficiency theory. *Cognition and Emotion* 6, 409-434
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*
- [19] FRANTZICH, H. (2001): Occupant Behaviour and Response Time – Results from Evacuation Experiments. Paper presented at the Human Behaviour in Fire, Boston. 159-165
- [20] FRIDOLF, K.; RONCHI, E.; NILSSON, D. & FRANTZICH, H. (2013): Movement speed and exit choice in smoke-filled rail tunnels. *Fire Safety Journal*
- [21] GOLDSTEIN, E. B. (2008): *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag
- [22] GROEGER, J. A. (2001): *Understanding driving: Applying cognitive psychology to a complex everyday task*: Hove Psychology Press
- [23] ILF Consulting Engineers (2008): *Analyse der Standardrisiken in Straßentunneln – Entwicklung einer Methode für eine Risikoanalyse gemäß EU-Richtlinie Tunnelsicherheit, Artikel 13. Schlussbericht*. Linz, 2008
- [24] INGASON, H. (2013): Spillförsök med vatten i Törnskogstunneln SP Sveriges (PX26984-2). SP Fire Technology (Ed.). 16.01.2013

- [25] ITA COSUF (2011): Updated survey of existing regulations and recognised recommendations (operation and safety of road tunnels)
- [26] KENNEDY, R. S.; LANE, N. E.; BERBAUM, K. S. & LILIENTHAL, M. G. (1993): Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3 (3), 203-220
- [27] KERN, H. (2013): Interview mit Aquasys Technik GmbH. Linz, 12.03.2013
- [28] KÖLL, M. (2013): Interview mit Betreiber Felbertauerntunnel. Lienz, 18.06.2013
- [29] KRATZMEIR, S. (2010a): Brandschutz im Eurotunnel, *Tunnel* (7), 33-36
- [30] KRATZMEIR, S. (2010b): ISTSS, Fixed fire fighting systems in tunnel integration and compensation. 24.08.2010
- [31] KULIGOWSKI, E. (2009): The process of human behavior in fires: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology
- [32] LAUX, L. (1981): *Das State-Trait-Angstinventar: STAI; theoretische Grundlagen und Handanweisung: Beltz Test*
- [33] LEMAIRE, A. et al. (2013): Fire curve for tunnels with deluge suppression system. 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels. Barcelona, September 2013
- [34] LENTZ, A. (2013): ILF Consulting Engineers. Auswertung der ASFINAG-Tunnelbrandstatistik 2006-2012, Analysen im Rahmen des Arbeitsausschusses zur RVS 09.03.11
- [35] LEUCKER, R. & LEISMANN, F. (2013): Ergebnisse von Brandversuchen zur Beurteilung der schadensmindernden Wirkung von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen, *Beton & Stahlbetonbau* (4)
- [36] LEUCKER, R. & LEISMANN, F. (2013): Fire Tests for Water Mist Fire Suppression Systems in Road Tunnels. World Tunnel Congress 2013 Geneva, Underground – the way to the future! G. ANAGNOSTOU & H. EHRBAR (eds.)
- [37] MAWHINNEY, J. R. & TRELLES, J. (2007): Computational fluid dynamics modelling of water mist systems on large HGV fires in tunnels. Proc. Pôle Européen de Sécurité. CNPP Vernon, France
- [38] MELVIN, B. J. et al. (2013): Design fire heat rate in road tunnels with fixed fire fighting systems. 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels. Barcelona. September 2013
- [39] MÜHLBERGER, A. & PAULI, P. (2000): Tunnelangstfragebogen (TAF) [Tunnel Anxiety Questionnaire: short-description and questionnaire]. Leibniz-Institute for Psychology Information (Eds.), Leibniz-Zentrum für Psychologische Information und Dokumentation (ZPID). Electronic test-archive
- [40] MURRAY, N. et al. (2003): Anxiety and performance A visual search examination for the processing efficiency theory. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 25, 171-187
- [41] NFPA (2010): Standard on water mist fire protection systems (750), National Fire Protection Association, Quincy, Mass
- [42] NFPA (2014): Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways (502). 2014 Edition
- [43] NILSSON, D.; JOHANSSON, M. & FRANTZICH, H. (2009): Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations. *Fire Safety Journal*, 44 (4), 458-468
- [44] NORMAN, D. (1968): Toward a theory of memory and attention. *Psychological Review*, 75 (6), 522-536
- [45] OneSeven (2013a): Interview mit Hersteller OneSeven of Germany GmbH. Luckenwalde, 15.03.2013
- [46] OneSeven (2013b): Broschüre: Stationäre Löschtechnik
- [47] OneSeven (2013c): Brandversuche im Runehamar Test Tunnel 2005. Email vom 20.11.2013
- [48] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (2014): RVS 09.03.11 Tunnel-Risikoanalysemodell

- [49] PAUL, D. (2013): Question about fires in the A86 tunnel. Email: denis.paul@vinci-autoroutes.com. 16.10.2013
- [50] PIARC (1999): Technical Committee on Road Tunnel, Fire and smoke control in road tunnels (05.05 B). 04.10.1999
- [51] PIARC (2008): Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operation, Road Tunnels, an assessment of fixed fire fighting systems (2008R07). 28.03.2008
- [52] POSNER, M. I.; SNYDER, C. R. & DAVIDSON, B. J. (1980): Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109 (2), 160-174
- [53] PROULX, G. A. (1993): Stress Model For People Facing A Fire. *Journal of Environmental Psychology*, 13, 137-147
- [54] PURSER, D. (1996): Behavioural impairment in smoke environments. *Toxicology*, 115 (1-3), 25-40
- [55] REY, I. (2013): PIARC Draft report on FFFS in Road Tunnels. Email: idelrey@etsii.upm.es. 16.12.2013
- [56] RODEWALD, G. (2005): *Feuerlöschmittel*. 7. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, ISBN 3-17-018492-X
- [57] RODEWALD, G. (2007): *Brandlehre*. 6. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, ISBN 978-3-17-019129-7
- [58] ROTHERMUND, K. & EDER, A. (2011): *Allgemeine Psychologie: Motivation und Emotion*. Basiswissen Psychologie, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften
- [59] SIME, J. D. (1985): Movement toward the familiar: Person and place affiliation in a fire entrapment setting. *Environment and Behavior*, 17 (6), 697-724
- [60] SINTEF (2008): Real-scale tests of Aquasys Water Mist Fire Suppression in Runehamar test tunnel, Norway. SINTEF report, Trondheim
- [61] SOKOLOV, E. N. (1963): Higher Nervous Functions: The Orienting Reflex. *Annu. Rev. Physiol*, 545-580
- [62] SOLIT (2008): *Safety of Life in Tunnels*, Forschungsbericht SOLIT – Wassernebelanlagen in Strassentunneln. 2008
- [63] SOLIT2 (2012): *SOLIT Safety of Life in Tunnels*. Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung. 2012
- [64] SPIELBERGER, C. D.; GORSUCH, R. L. & LUSHENE, R. E. (1970): *Manual for the state-trait anxiety inventory*
- [65] STARKE, H. (2010): Vortrag: Brandbekämpfung mit Wassernebel, Geschichte, Physikalische Grundlagen, Systemüberblick, national und international relevante Richtlinien. IWMF, Frankfurt. 30.11.2010
- [66] SUGIMAN, T. et al. (1988): Development of a new evacuation method for emergencies Control of collective behavior by emergent small groups. *Journal of Applied Psychology*, 73 (1)
- [67] TARADA, F. et al. (2013): The energy budget in suppressed tunnel fires. 15th International Symposium on Aerodynamics, Ventilation & Fire in Tunnels. Barcelona, September 2013
- [68] UPTUN (2006): Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNNELS, D52b Fire growth models: Water-based suppression systems. 24.10.2006
- [69] Verein zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (2011): Heft 3/2001
- [70] WAHL, G. (2013): Interview mit Betreiber Pörzbergtunnel (TLBV Thüringen). Thüringen, 29.04.2013
- [71] Weltgesundheitsorganisation (2008): *Internationale Klassifikation psychischer Störungen*. Bern: Huber

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen Hegger, Reißer € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem
Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken
Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken
Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse
Borrmann, Fischer, Dori, Wild
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke
Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken
Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel
Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken
Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken
Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton
Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken
Müller € 15,00

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke, Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brennerberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln
Mayer, Brenninger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Stand-
sicherheit und Gebrauchstauglichkeit**

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln
Schmidt, Simon, Guder, Juknat,

Hegemann, Dehn € 16,00

**B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vor-
gespannten Zweifeldträger**

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 121: Zerstorungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten
Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperie-
rung von Brücken**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

**B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken
– Restnutzung**

Geißler, Krohn € 15,50

**B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Daten-
auswertung nachgerechneter Bauwerke**

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infra-
strukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thró
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im
Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**

Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

**B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der
Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**

Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Model-
le und RFID-Tags**

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbau-
werke**

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisie-
rungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nach-
haltigkeit**

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchti-
gungskonzepte von Straßenbrücken**

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

**B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen
in Straßentunneln**

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

Fachverlag NW in der Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de