



SOLIT Safety of Life in Tunnels

**Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung
von Tunneln mit Brandbekämpfungs-
anlagen sowie deren Planung**

**Wissenschaftlicher Abschlussbericht
zum SOLIT² Forschungsvorhaben, erstellt
durch das SOLIT² Forschungskonsortium**

**Anhang 1:
Statusanalyse**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

© SOLIT² Konsortium 2012

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19S9008 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dieses Dokument wurde nach bestem Wissen und mit großer Sorgfalt erstellt. Das Dokument sowie seine Anhänge sind nur für den Gebrauch durch erfahrene Brandschutzexperten bestimmt. Eine Beurteilung über die Anwendbarkeit dieses Dokuments auf seinen spezifischen Anwendungsfall muss durch den Leser erfolgen.

Alle Rechte in Bezug auf den Inhalt, insbesondere das Urheberrecht betreffend, sind vorbehalten.

Einordnung

Im Rahmen des Verbund-Forschungsprojektes SOLIT² - Safety of Life in Tunnels, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 19S9008 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages haben die Mitglieder des Forschungskonsortiums wissenschaftliche Einzelberichte zu den jeweils von ihnen bearbeiteten Teilprojekten und Arbeitspaketen erstellt. Wesentliche Ergebnisse der Einzelberichte wurden in dem vorliegenden Leitfaden zusammengefasst. Der Leitfaden wurde gemeinsam von den Konsortialmitgliedern erstellt und ist der gemeinsame wissenschaftliche Abschlussbericht des SOLIT²-Konsortiums. Daneben ist der Leitfaden ein Teil der Arbeitspakete. Die Einzelberichte sind über den Projektkoordinator erhältlich.

Impressum:

Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung

Anhang 1: Statusanalyse

Dieses Dokument basiert auf dem Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung. Für diesen Leitfaden sind die folgenden Anhänge verfügbar:

Anhang 2: Ausgewählte Ergebnisse aus den Brandversuchen

Anhang 3: Planungsleitfaden für stationäre Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln

Anhang 4: Beispielhafte Anwendung der Risikoanalyse

Anhang 5: Sicherheitsbewertung von Betriebstechnik

Anhang 6: Lebenszykluskosten von Betriebstechnik

Anhang 7: Brandszenarien zur Überprüfung der Wirksamkeit von BBA

An der Erstellung der Dokumente haben die folgenden Personen mitgewirkt:

BUNG AG, Beratende Ingenieure

Wolfgang Baltzer

Uwe Zimmermann

FOGTEC Brandschutz GmbH & Co KG

Tobias Hoffmann

Max Lakkonen

Dirk Sprakel

Sascha Wendland

Ruhr Universität Bochum – Lehrstuhl für Tunnelbau,

Leitungsbau und Baubetrieb

Markus Thewes

Götz Vollmann

STUVA Studiengesellschaft für unterirdische

Verkehrsanlagen e. V.

Frank Leismann

Roland Leucker

Antonio Piazzolla

TÜV Süd Rail GmbH

Jürgen Heyn

Jakob Zaranek

Lutz Neumann

IFAB Institut für angewandte Brandschutzforschung GmbH

Stefan Kratzmeir

Rajko Rothe

Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt

Mario Koch

Horst Starke

Die Mitglieder des Forschungskonsortiums danken dem wissenschaftlichen Beirat für wertvolle Hinweise und Anregungen im Vorfeld der Durchführung der Brandversuche: Felix Amberg (ITA-COSUF), Frank Heimbecher, Jürgen Krieger (Bundesanstalt für Straßenwesen), Ingrid Ortlepp (Thüringer Innenministerium), Werner Thon (Feuerwehr Hamburg), Bernhard Koonen (Projekträger Mobilität und Verkehr), Robert Sauter (ADAC e. V.).

Herausgeber:

SOLIT² Forschungskonsortium, bestehend aus:

BUNG AG – Beratende Ingenieure

FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG

Ruhr Universität Bochum – Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

STUVA Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.

TÜV Süd Rail GmbH

Druck und Verlag:

Die Dokumente erscheinen im Eigenverlag und sind über contact@SOLIT.info oder direkt über die Herausgeber erhältlich.

Köln

Version: 1.1; Bearbeitungsstand: November 2012

Der Leitfaden wird durch das Forschungskonsortium weiter überarbeitet. Neue Bearbeitungsstände können über das Forschungskonsortium unter contact@SOLIT.info angefragt werden.

Projektkoordinator: FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG, Schanzenstraße 19, 51063 Köln

Inhaltsverzeichnis

Teil 1	Einleitung	5
Teil 2	Grundlagen.....	6
2.1	Brandbekämpfungsanlagen (BBA)	6
2.2	Wirkungsweise von Wasserdampf-Brandbekämpfungsanlagen	7
Teil 3	Stand der Technik zur Anwendung von Brandbekämpfungsanlagen	9
	Weltweite Verbreitung	9
3.1	Fallstudien zu Straßentunneln	9
3.1.1	Europa	9
3.1.2	Amerika.....	13
3.1.3	Australien	14
3.1.4	Asien.....	16
3.1.5	Weitere Staaten	17
3.2	Sonstige Nutzung	17
3.3	Bewertung und Vorbehalte	18
3.4	Internationale Regelwerke und Leitlinien	20
3.5	Nationale Richtlinien	23
Teil 4	Brandversuche.....	25
4.1	Ofenegg-Tunnel (1965)	25
4.2	Japanische Versuchsreihen (1960-2001)	25
4.3	Versuchsreihen des VTT in Finnland (1990)	25
4.4	US-amerikanische Versuche im Memorial-Tunnel (1993-1995)	25
4.5	Benelux Tunnel Tests (2001).....	25
4.6	CETU-Versuche (seit 2002).....	26
4.7	Versuchsstollen Hagerbach A86 (2003)	26
4.8	UPTUN (2002-2006).....	26
4.8.1	DMT (2004).....	27
4.8.2	Versuchsreihe im Virgolo-Tunnel (2005).....	27
4.8.3	IF Oslo	27
4.9	SOLIT (2004-2006).....	28
4.10	A73-Tests (2005-2008).....	28
4.11	SP-Versuche im Modellmaßstab (2006)	28
4.12	Building Research Establishment BRI (2006-2009).....	28
4.13	M30 Tests in Spanien (2006).....	28
4.14	Euro-Tunnel (2010).....	29
Teil 5	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	30
5.1	Schlussfolgerungen	30
5.2	Forschungsbedarf.....	30
Teil 6	Quellenverzeichnis	32
6.1	Abbildungen.....	32
6.2	Referenzen	32

Teil 1 Einleitung

Im Arbeitspaket 2 – Statusanalyse – des Forschungsvorhabens SOLIT2 ist eine umfangreiche Datensammlung zum Themengebiet „Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Tunneln“ erarbeitet worden. Die Daten wurden mittels detaillierter Literaturrecherche, Internetrecherche, schriftlicher Befragung der Vertreter aller ITA¹-Mitgliedsländer mittels Fragebogen sowie direkter Befragung allgemein anerkannter Experten und Firmen auf dem Gebiet der Tunnelsicherheit (persönlich / telefonisch / per E-Mail) zusammengetragen.

Die Ergebnisse der Recherche sind im Schlussbericht des AP 2 (nicht veröffentlicht) zusammengestellt. Darin enthalten ist eine Dokumentation bisher weltweit ausgeführter und publizierter Anwendungen von Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Straßentunneln ergänzt durch die Beschreibung von Anwendungen in Eisenbahn- und U-Bahntunneln. Ergänzend werden auch Erfahrungen mit dem Betrieb von BBA sowie grundsätzliche Expertenmeinungen zu diesem Thema zusammengestellt. Basierend auf einem Kompendium der Grundlagen ist im Schlussbericht der aktuelle Wissensstand bezüglich technisch-physikalischer Zusammenhänge bei Brandbekämpfungsanlagen dokumentiert. Darüber hinaus werden die weltweit vorhandenen Richtlinien und Regelwerke ausgewertet sowie die Eckdaten und wesentlichen Erkenntnisse bisher durchgeführter Brandversuche dokumentiert [Solit2 2009].

Im hier vorliegenden Kurzbericht werden Auszüge der beschriebenen Statusanalyse in kompakter Form und mit deutlich reduzierter Tiefe der Informationen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Auf die Darstellung der Grundlagen sowie wettbewerbsrelevanter Informationen wird in diesem Kurzbericht weitgehend verzichtet.

¹ International Tunnelling And Underground Space Association
www.ita-aites.org

Teil 2 Grundlagen

2.1 Brandbekämpfungsanlagen (BBA)

Definition nach PIARC

Die PIARC² verwendet die folgende Definition für „Fixed Fire Fighting Systems (FFFS)“ in Analogie zum hier verwendeten deutschen Begriff „Brandbekämpfungsanlage (BBA)“ [PIARC 2008]:

Fest installierte Brandbekämpfungsanlagen (BBA) in Straßentunneln werden definiert als Brandbekämpfungsausrüstung, welche permanent im Tunnel installiert ist und über ein Rohrsystem zur ständigen Versorgung mit Wasser oder einem anderen Löschmittel verfügt. Durch Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage und Freisetzung des Löschmittels soll eine Reduzierung der Wärmefreisetzungsrates und der Brandausbreitung erzielt werden. Beispiele für BBA sind Sprinkler³, Sprühflut- und Wassernebel-Anlagen.

Gründe für den Einbau einer Brandbekämpfungsanlage

Die primäre Aufgabe einer Brandbekämpfungsanlage in Straßentunneln ist die Bekämpfung und Kontrolle von Bränden, bis diese durch die Feuerwehr vollständig gelöscht werden können. Da die meisten Brände innerhalb von Fahrzeugen im Motor-, Passagier- oder Laderaum entstehen, ist ein endgültiges Löschen durch eine im Tunnel (und nicht direkt im Fahrzeug) installierte BBA in der Regel nicht möglich.

Die Hauptaufgaben einer automatischen Brandbekämpfungsanlage sind:

- Begrenzung bzw. Reduzierung der Wärmefreisetzungsrates und damit in der Folge auch Reduzierung der Rauchgasproduktion, insbesondere während der Selbstrettungsphase in den ersten 5 bis 10 Minuten nach Brandausbruch,
- Reduzierung der Temperaturen am Brandherd und damit in der Folge auch Reduzierung des Rauchgasvolumens [Kratzmeir 2008],
- Verhinderung eines Feuerübersprungs auf andere Fahrzeuge,
- Verbesserung der Einsatzbedingungen für die Feuerwehr,
- Aufrechterhaltung der Betriebsbedingungen anderer Sicherheitssysteme, z. B. Vermeidung einer Überhitzung des Lüftungssystems,
- Sekundär auch Schutz des Bauwerks durch verminderte Temperatureinwirkung [Bettolini und Seifert 2009].

Verfügbare Systeme

Die Verwendung von reinem Wasser oder Wasser mit Zusatzstoffen als Löschmittel in BBA ist weltweit übliche Praxis. Theoretisch können auch Gase als Löschmittel

eingesetzt werden, bei denen die Löschwirkung auf dem Einsatz inerter Gase (Kohlendioxid CO₂, Stickstoff N₂) oder von teilweise halogenisiertem CO₂, CHF₃ oder CF₃CHFCF₃ basiert. Letztere Systeme werden für Spezialanwendungen im Gebäudebereich eingesetzt. Eine Anwendung im Tunnel ist aufgrund der vorliegenden Randbedingungen nicht möglich, da Löschanlagen auf Gasbasis einen weitgehend gasdicht abgeschlossenen Raum erfordern [Haack 2007].

Unabhängig von der Art der BBA bestehen Löschanlagen in Tunneln aus einem meist an der Decke im Raster angeordneten System von Düsen.

Wasserbasierte Löschanlagen können in drei Gruppen eingeteilt werden [Häggkvist 2009]:

- Herkömmliche Sprinkleranlagen mit Nassleitungen
- Anlagen mit Trockenleitungen, die im Weiteren nach der Wassertropfengröße unterschieden werden
 - Sprühflutanlagen
 - Wassernebelanlagen
- Schaumlöschanlagen.

Im Hochbaubereich ist die Verwendung von Sprinkleranlagen weit verbreitet. Dabei steht das mit Wasser gefüllte zugehörige Rohrleitungssystem permanent unter Druck (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.

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

- Durch die im Tunnel in der Regel vorhandene Luftbewegung wird die Hitze des Brandes vom Brandort weggeführt, was zur Auslösung von Sprinklerdüsen abseits des Brandortes führt.
- Ein Feuer im Tunnel erzeugt rasch große Mengen an Wärme, so dass zu viele Sprinkler gleichzeitig und irreversibel öffnen und letztlich nicht ausreichend Wasser mit wirtschaftlichen Rohrleitungsquerschnitten und Pumpen zugeführt werden kann.

Eine Sprühflutanlage besteht im Unterschied zur Sprinkleranlage aus einem System von permanent offenen Düsen. Die Anlage ist in Zonen eingeteilt, wobei deren Länge in Analogie zu den Abmessungen eines LKW in der Regel etwa 30 m beträgt. Im Brandfall öffnet eine elektronische Steuerung die Bereichsventile in der Zone über dem Feuer und in den beiden angrenzenden Abschnitten. Wasser sprüht somit aus allen Düsen in den aktivierten Zonen.

Sowohl konventionelle Sprinkler als auch Sprühflut- und Wassernebelanlagen verwenden als Löschmittel Wasser, um den Brand einzudämmen bzw. zu kontrollieren. Das freigesetzte Wasser führt Hitze direkt aus der Flamme ab, kühlt die heißen Verbrennungsgase oder die Oberfläche der Brandlast. Dabei entstehender Was-

² World Road Association

³ Im englischen Sprachgebrauch werden Sprühflutanlagen auch als Sprinkler-Anlagen bezeichnet, weil das Ausbringen des Wassers mit Sprinklerdüsen erfolgt. Insofern können hier mit der Bezeichnung „Sprinkler“ auch „Sprühflutanlagen“ gemeint sein.

serdampf verdrängt Sauerstoff im Brandbereich. Diese Eigenschaften zeichnen in Summe Wasser als gut geeignetes Löschmittel aus. Die vorwiegende Wirkungsweise hängt maßgeblich von der Wassertropfengröße und damit vom Wasserdruck und der Geometrie der Düsen ab. Abbildung 1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Tropfengröße und Kühlwirkung.

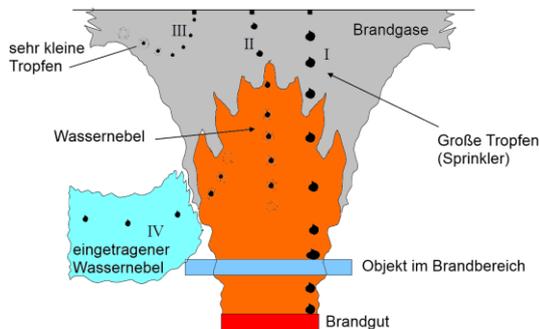


Abbildung 1: Wirkungsweise und -ort verschiedener Wassertropfengrößen [UPTUN 2006]

Große Tropfen, wie an Stelle I in Abbildung 1 dargestellt, sind charakteristisch für herkömmliche Sprinkleranlagen. Die Tropfen fallen durch die Flammen, kühlen hauptsächlich das Brandgut und durchfeuchten noch unverbrannte Brandlasten. Die Verbrennungsgase werden im Verhältnis zur eingesetzten Wassermenge kaum gekühlt, da die spezifische Oberfläche der großen Tropfen gering ist. Große Tropfen sind des Weiteren nicht geeignet, um Flüssigkeitsbrände zu löschen: Insbesondere wenn die brennende Flüssigkeit nicht wasserlöslich ist und eine geringere Dichte als Wasser aufweist, bildet sich eine brennende Lache auf dem freigesetzten Löschwasser.

Tropfen geringerer Größe, wie an Stelle II in Abbildung 1 dargestellt, dringen in die Flammen und heißen Gase (Plume) ein und erreichen zu einem gewissen Anteil auch das Brandgut. Sie kühlen und hemmen hauptsächlich den Verbrennungsvorgang und können den Brand unter günstigen Umständen auch löschen. 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 Wassertropfen können daher schnell verdampfen, was aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität und der hohen Verdampfungsenthalpie ($E=2.634 \text{ kJ/l}$) von Wasser mit einer sehr großen Kühlwirkung bei Wasserdampfanlagen einhergeht. Tropfen dieser geringen Größe werden von Wasserdampfanlagen erzeugt, wie sie Gegenstand des Projektes SOLIT2 sind.

Mit weiter abnehmendem Durchmesser der Tropfen, wie es ausgehend von der Stelle III in Abbildung 1 dargestellt ist, wird der Verdunstungsprozess überproportional beschleunigt, was zur Kühlung und Hemmung der Reaktionsneigung führt. Gleichzeitig verringert sich aber mit abnehmendem Durchmesser die Fähigkeit der Tropfen in die Flammen einzudringen [Häggkvist 2009].

2.2 Wirkungsweise von Wasserdampf-Brandbekämpfungsanlagen

Temperaturreduzierung

Die kühlende Wirkung von Wasserdampf ist in diversen Versuchsreihen nachgewiesen worden [Kratzmeir 2008]. Die Temperaturabnahme basiert im Wesentlichen auf dem Wärmeaustausch zwischen den heißen Rauchgasen und den Wassertropfen. Bei Verdunstung der Wassertropfen absorbieren diese einen Teil der Wärmeenergie. Zusätzlich wird das Temperaturniveau im Tunnel durch eine Abnahme der Wärmefreisetzungsrate des Feuers durch die Wirkung des Wasserdampfs verringert.

Die Aktivierung einer Wasserdampfanlage bewirkt unvermeidlich eine Durchmischung der Luft verbunden mit einer gewissen Angleichung der Temperaturen über die gesamte Höhe des Tunnels. Eine ggf. zuvor vorhandene stabile Rauchgasschichtung wird in den aktivierten Sektionen durch die eintretende Abkühlung gestört. Rauchpartikel werden von den Tropfen abwärts mitgerissen und die Tendenz von Turbulenzen verstärkt. Die Änderung der Temperaturverteilung bewirkt im unteren Bereich des Tunnels eine (moderate) Erwärmung.

Erhöhung der Luftfeuchtigkeit

Mit der Temperaturabnahme durch den Einsatz einer Wasserdampfanlage geht eine Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit einher. Größere Mengen an Wasser in der Atmosphäre des Tunnels beeinträchtigen die Überlebensbedingungen im Tunnel. Bei trockener Luft besteht ab Temperaturen von 120° C die Gefahr von Verbrennungen der Haut oder des Atmungsapparates. Bei teilweise mit Wasser angereicherter Luft sinkt dieser Grenzwert auf 80° C ab. Bei vollständig mit Wasser gesättigter Luft kann eine Temperatur von 60° C über einen Zeitraum von etwa 30 Minuten ertragen werden [Cetu 2010].

Reduzierung der Wärmestrahlung

Wasserdampf hat eine reduzierende Wirkung auf die Ausbreitung von Strahlungswärme. Die in der Luft schwebenden Tröpfchen bilden eine Art Schirm gegen die vom Feuer ausgehende Wärmestrahlung und absorbieren die Energie teilweise. Die maximale Absorption tritt im Wellenlängenbereich auf, der dem Tropfendurchmesser entspricht [Cetu 2010].

Verhinderung der Brandausbreitung

Eine Reduzierung der Strahlungswärme in Kombination mit verminderter Lufttemperatur führt zu einer deutlichen Verringerung des Risikos der Brandausbreitung, d. h. von Feuerübersprung zwischen Fahrzeugen im Tunnel. Dieser Effekt ist bei Feststoffbränden eindeutig nachgewiesen.

Bei Flüssigkeitsbränden kann die Ausbreitung durch austretende und je nach örtlichen Umständen am Boden fließende brennbare Flüssigkeiten erfolgen. Die Freisetzung von Wasser auf brennende Flüssigkeiten vergrößert die vorhandene Flüssigkeitsmenge und unterstützt damit tendenziell die Ausbreitung von Flüssigkeitsla-

chen, insbesondere unter ungünstigen Umständen, wie z. B. geneigten Tunneln [Cetu 2010].

In der Regel sind in Tunneln jedoch Schlitzrinnen installiert, denen durch die Fahrbahnquerneigung Flüssigkeiten auf kurzem Weg relativ schnell zugeleitet werden. Die ungehemmte Ausbreitung von Flüssigkeitslachen wird deshalb stark begrenzt. Gleichzeitig bewirkt die Zuführung von Löschwasser auch eine Verdünnung der brennbaren Flüssigkeit, so dass pro Zeiteinheit weniger Flüssigkeit verbrannt werden kann.

Wärmefreisetzungsrate – Heat Release Rate (HRR)

Eine Wassernebel-BBA hat eine begrenzende Wirkung auf die Wärmefreisetzungsrate 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 [Cetu 2010].

Sichtverhältnisse

Die Sichtweite hängt von der Konzentration der Rauchpartikel und der Wassertropfen in der Luft, der Größe der Wassertropfen und den Lichtverhältnissen im Tunnel ab. Eine in begrenztem Umfang auftretende Auswaschung von Rauchpartikeln durch den Wassernebel wirkt sich dabei günstig auf die Sichtverhältnisse aus. Diese ist aber nur sehr schwer messtechnisch und theoretisch erfassbar. Daher gilt der Effekt der Rauchgasauswaschung bisher nicht als nachgewiesen.

Ein weiterer potentieller Effekt mit Einfluss auf die Sichtverhältnisse besteht, wenn in der Nähe des Brandes entstandener Wasserdampf abluftseitig wieder kondensiert und dann Nebel erzeugt.

Sofern bei (kleinen) Bränden im Tunnel überhaupt eine Rauchgasschichtung vorliegt, können die Sichtverhältnisse durch die Aktivierung einer Wassernebelanlage verschlechtert werden, weil durch den Impuls des Wassers und die Abkühlung der Rauchgase eine sehr turbulente Strömung entsteht. Der Rauch wird durch die Wassertropfen gewissermaßen in vorher rauchfreie Bereiche mitgerissen [Cetu 2010]. Auch ohne den Einsatz einer BBA kann in der Regel bei größeren Bränden infolge der Turbulenzen und thermischen Effekte aber nicht von einer Rauchgasschichtung ausgegangen werden.

In rauchgasfreien Bereichen innerhalb eines Tunnels verschlechtern sich die Sichtverhältnisse durch die Aktivierung einer Wassernebelanlage nur in unkritischem Maße, so dass die Bedingungen für die Selbstrettung der Tunnelnutzer nur unmaßgeblich beeinträchtigt werden [Kratzmeir 2008].

Giftigkeit von Rauchgasen

Die Entstehung giftiger Gase bei einem Brand ist eine Funktion der Wärmefreisetzungsrate, der Lüftungsbedingungen (Sauerstoffversorgung) und der Art des Brennstoffs. Die Erzeugung von Kohlendioxid (CO₂) hängt dabei nahezu ausschließlich von der Wärmefreisetzungsrate ab, während Kohlenmonoxid (CO) und

Stickoxyde (NO_x) auch von der Verdampfungsrate des Brennstoffs abhängen. Diese wiederum wird von der Art des Brennstoffs und der Sauerstoffversorgung beeinflusst. Daher reduziert der Einsatz einer Wassernebelanlage die CO₂-Produktion aufgrund veränderter Verbrennungsreaktion.

Die qualitative und quantitative Einschätzung der Auswirkungen einer Wassernebelanlage auf die Produktion von CO und NO_x ist ebenfalls sehr komplex. Diese Gase sind unter den im Tunnel vorherrschenden Bedingungen praktisch nicht wasserlöslich, was bei Brandversuchen zum A86 Tunnel (siehe Kapitel 4.7) nachgewiesen werden konnte. Dagegen sind andere giftige Gase, die bei einem Brand im Tunnel freigesetzt werden können, wie z. B. Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeldioxid (SO₂) oder Cyanwasserstoff (HCN) gut wasserlöslich. Die Lösung dieser Gase in Wasser führt zur Bildung von Salzsäure, Schwefelsäure bzw. Blausäure. Die Analyse des auf der Fahrbahn angesammelten Wassers nach Durchführung der oben genannten Brandversuche zur A86 zeigte einen niedrigen pH-Wert im Bereich von 2.

Der derzeitige Wissensstand gestattet keine quantitative Vorhersage dieser Phänomene unter den Temperatur- und Druckverhältnissen eines Brandes im Tunnel. Letztlich ist die räumliche Verteilung der Rauchgase wichtiger als die Toxizität der Rauchgase, um die Gefährdung der Nutzer und die Einschränkungen der Selbstrettung zu beurteilen. Insofern wird auf die Ausführungen zur Rauchgasschichtung im vorangehenden Abschnitt „Sichtverhältnisse“ verwiesen. Die Festlegung des geeigneten Auslösezeitpunktes ist diesbezüglich von besonderer Bedeutung [Cetu 2010].

Bauwerksschutz

Durch die eindämmende Wirkung einer Wassernebelanlage auf die Brandentwicklung (Temperatur, Wärmestrahlung, Wärmefreisetzungsrate) und die Brandausbreitung wird die Erwärmung der Tunnelkonstruktion vermindert. Ein früher Auslösezeitpunkt erhöht dabei die Effektivität des Bauwerksschutzes, darf das Ziel der Lebensrettung durch Selbstrettung und Fremdrettung aber nicht beeinträchtigen. Der Bauwerksschutz ist insofern nicht als vorrangiges Schutzziel zu werten. Grundsätzlich sind die Aktivierungskriterien zur Lebenserhaltung höher zu bewerten als jene zum Schutz der Infrastruktur [Cetu 2010].

Feuerwehreinsatz in Kombination mit Brandbekämpfungsanlagen

Die Feuerwehrtaktik und die Vorgehensweise beim Einsatz der Rettungskräfte können sich durch die Installation einer BBA (Sprühflut- oder Wassernebelanlage) grundlegend ändern und müssen daher einer eingehenden Prüfung unterworfen werden. Die geeignete Einsatztaktik kann sich in Abhängigkeit des Systems und der Steuerung (manuell, automatisch) unterscheiden. Grundsätzlich ist das Ziel einer Brandbekämpfungsanlage, auch die Einsatzbedingungen der Feuerwehr zu verbessern [Hjelm, Ingason und Lönnermark 2010].

Teil 3 Stand der Technik zur Anwendung von Brandbekämpfungsanlagen – Weltweite Verbreitung

Im Folgenden werden die recherchierten Ergebnisse zum Stand der Technik hinsichtlich der weltweiten Verbreitung und Anwendung von Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln zusammengefasst.

3.1 Fallstudien zu Straßentunneln

3.1.1 Europa

In Europa existieren derzeit in keinem Land nationale Vorschriften, welche die Installation von BBA grundsätzlich fordern. Ungeachtet dieser Vorschriftenlage besteht erkennbar eine Tendenz, insbesondere neue Tunnel zunehmend mit solchen Systemen auszustatten.

Belgien

Nach derzeitigem Kenntnisstand sind in Belgien keine BBA in Straßentunneln installiert. Es sind keine neuen Projekte seit der Veröffentlichung [PIARC 1999] bekannt geworden.

Bulgarien

Von Bulgarien wird die Information, ob BBA bei Tunnelprojekten vorhanden, geplant oder im Bau befindlich sind, als sicherheitsrelevant eingestuft. Daher wird darüber keine Auskunft erteilt [Georgieva 2010].

Dänemark

In Dänemark sind derzeit keine Straßentunnel mit einer BBA ausgerüstet, es bestehen lediglich Überlegungen zur Nachrüstung im Øresundtunnel. Der Øresundtunnel ist ein Unterwassertunnel mit einer Länge von 3.510 m, bestehend aus 4 Röhren (2 Röhren für Straßenverkehr mit je zwei Fahrstreifen je Richtung und zwei Röhren für Bahnverkehr) und einem technischen Verbindungsgang zwischen den Straßentunneln. Dieser Gang ist im Gegensatz zu den Verkehrstunneln bereits zum Schutz vor Kabelbränden mit einer Wasserebelanlage ausgerüstet. Nach dem bestehenden Sicherheitskonzept bieten die im Abstand von 88 m vorhandenen Notausgänge in die benachbarten Tunnelröhren ein, gemessen an den Vorschriften, ausreichendes Sicherheitsniveau für den Personenschutz.

Hinsichtlich der Abwendung von größeren Schäden an der Tunnelkonstruktion kann nach Auffassung des Betreibers eine BBA vorteilhaft sein, wobei allerdings neben den reinen Installationskosten auch die Instandhaltungskosten zu betrachten sind. Die Verantwortung für die Wahl der Tunnelsicherheitsysteme liegt beim Tunnelbetreiber (hier Øresund Bridge Consortium) mit Genehmigungspflicht durch die zuständige Behörde [Eskesen 2010].

Des Weiteren ist bei der geplanten festen Fehmarnbeltquerung der Einbau einer Sprühflutlöschanlage vorgesehen. Nach Stand der Planung im Jahr 2012 erhält die

Fehmarnbeltquerung (Bauzeit 2015 bis 2021) mit großer Wahrscheinlichkeit die Gestalt eines 17,6 km langen Absenktunnels mit je zwei getrennten Röhren für Autos und Züge sowie einem technischen Verbindungsgang [Fernern 2011].

Deutschland

In Deutschland ist bislang lediglich ein Straßentunnel im Rahmen eines Pilotprojektes mit einer automatischen Brandbekämpfungsanlage ausgerüstet worden (Stand 2011). Der Pörzbergtunnel in Thüringen ist mit 1140 Metern Deutschlands längster Landstraßentunnel. Er verbindet die Städte Rudolstadt und Stadtilm und ist im Jahr 2010 mit einer Druckluftschaumanlage ausgerüstet worden. Der Pörzbergtunnel ist in 48 Aktivierungsbereiche zu je 25 Metern eingeteilt. In jedem Bereich sind drei Rotoren angeordnet, aus denen der Schaum verteilt wird. Im Brandfall springen nach der Detektion automatisch die Rotoren des betreffenden und der beiden angrenzenden Löschbereiche auf insgesamt 75 Metern Länge an [Märkische Allgemeine Zeitung online 2012].

Für den 3 km langen Tunnel Jagdberg im Zuge des sechsstreifigen Ausbaus der Autobahn A4 wurde Mitte 2012 eine BBA ausgeschrieben. Der Amtsentwurf der Ausschreibung sah eine Schaumlöschanlage vor, es wurden jedoch auch andere Löschanlagentypen zugelassen. Ob der Tunnel mit einer Löschanlage ausgerüstet wird und welches System (Schaum/Wasser/Wasserebel) dabei zum Einsatz kommt ist bislang (Stand Nov. 2012) nicht veröffentlicht.

Seitens der Genehmigungsbehörden besteht Interesse an der Grundlagenforschung und Weiterentwicklung von BBA, was durch die Förderung der Projekte SOLIT (2004-2006) und SOLIT2 (2010-2012) dokumentiert wird. Die Ergebnisse der Forschungsprojekte sollen bei zukünftigen Entscheidungen über den Einbau von automatischen Brandbekämpfungsanlagen einfließen. Es sind jedoch zur Zeit keine konkreten Maßnahmen bzw. das Einbringen expliziter Forderungen in Richtlinien geplant [BAST 2011].

Finnland

In Finnland wurde zum Jahresende 2009 der erste Straßentunnel mit einer Brandbekämpfungsanlage auf Wasserebelbasis ausgestattet. Es handelt sich um den 2 km langen „Keskustan huoltotunneli, KEHU“-Helsinki-Service-Tunnel. Dieser verbindet mehrere Einkaufszentren in der Stadtmitte inklusive der zugehörigen Parkhäuser und Versorgungstunnel mit der Universität von Helsinki. Der Tunnel liegt in einer Tiefe von ca. 30–40 m und ist bereichsweise für Parkzwecke und Versorgungsfahrten reserviert. Die durchschnittliche lichte Höhe des Tunnels beträgt 5,50 m bei Breiten zwischen 7 m bis 20 m. In das Tunnelsystem sind vier Kreisverkehre unterschiedlicher Abmessungen integriert.

Die Rettungsdienste haben im Jahr 2009 mehrere Tests und Übungen durchgeführt und bewerten die gewonnenen Erfahrungen als positiv. Auch im Winter traten keine Probleme aufgrund der niedrigen Temperaturen auf. Der Gebrauch der Anlage wird als einfach und effektiv ein-

geschätzt. Im Vergleich zu herkömmlichen Sprinkleranlagen traten geringere Investitionskosten auf [Järvinen 2010].

Bei mehreren nicht näher genannten Projekten (zwei Autobahntunnel außerhalb von Helsinki und sechs Tunnel im Stadtbereich von Helsinki) wird im Rahmen des Entwurfs die Ausrüstung einer Wassernebelanlage untersucht. Die Entscheidung für ein solches System oder alternative Sicherheitseinrichtungen wird auf Basis einer durchzuführenden Risikoanalyse getroffen werden.

Frankreich

Die Sachlage im Zusammenhang mit dem Einsatz von Wassernebelanlagen in Straßentunneln in Frankreich hat sich gegenüber dem im Jahr 2008 im letzten PIARC-Bericht (siehe Kapitel 4.1) beschriebenen Zustand praktisch nicht verändert. Nach wie vor ist der A86-Tunnel in Paris das einzige Projekt, bei dem eine BBA (Wassernebelanlage) zum Einsatz kommt.

Die A86, auch super-périphérique oder Périphérique de l'Ile-de-France genannt, ist eine Ringautobahn um Paris mit einer Gesamtlänge von etwa 78 km. Der für den Ringschluß erforderliche letzte Bauabschnitt im Westteil führt als "Duplex"-Pkw-Tunnel die Fahrbahnen übereinander und ist mit einer BBA ausgerüstet.

Die Gesamtlänge des Tunnels der A86, der im Juni 2008 für den Verkehr freigegeben wurde, beträgt ca. 10.300 m. Unter Berücksichtigung der zugehörigen Verbindungstunnel und der zwei Fahrebenen waren ca. 24 km Tunnelröhren mit Brandschutzmaßnahmen zu schützen. Der A86 Tunnel weist die bauliche Besonderheit auf, dass es sich um einen mittels Tunnelvortriebsmaschine aufgefahrener Kreisquerschnitt handelt, welcher in zwei Verkehrsebenen genutzt wird. Daraus resultiert eine lichte Deckenhöhe der Verkehrsebenen von lediglich 2,55 m, so dass dementsprechend kein Schwerlastverkehr im Tunnel zugelassen bzw. möglich ist. Je Verkehrsebene und Fahrtrichtung sind drei Fahrstreifen mit Richtungsverkehr angeordnet. Die beiden Verkehrsebenen sind untereinander im Abstand von 200 m durch Treppenschächte verbunden und alle 1.000 m existiert ein Fluchtweg an die freie Oberfläche. Der Tunnel ist mit einem Belüftungssystem ausgestattet, welches Frischluft auf beiden Verkehrsebenen aus speziellen Luftkanälen abgibt. Die Luftabzugs- und Frischluftkanäle verlaufen entlang der Decke und im Bereich unter der Straße (Abbildung 2).

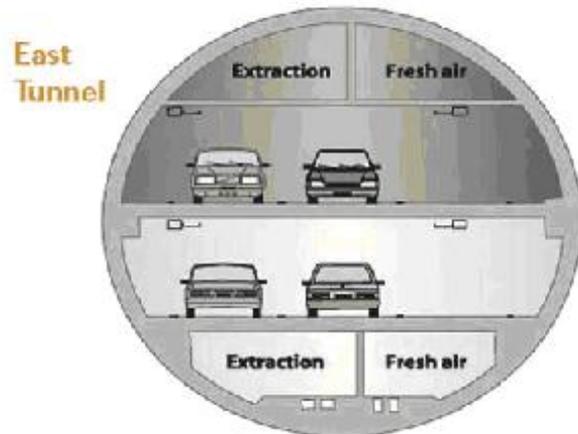


Abbildung 2: Lüftungssystem im A86-Tunnel (<http://www.fhwa.dot.gov/>)

Im Dezember 2010 kam das Löschsystem im A86-Tunnel – mit insgesamt 850 Zonen und 16.000 Sprühköpfen [Vuolle] – erstmalig unter Realbedingungen zum Einsatz, als ein PKW in Brand geriet. Das System arbeitete wie geplant und bereits 1½ Stunden nach Ausbruch des Feuers konnte der Tunnel wieder in den regulären Betrieb gehen. Alle beteiligten Verantwortlichen bewerteten die Erfahrungen aus diesem Einsatz sehr positiv [Le Parisien 2011].

Griechenland

In Griechenland sind bislang keine BBA in Tunneln installiert worden. Es sind derzeit auch keine entsprechenden Projekte im Bau oder geplant.

Großbritannien

In Großbritannien sind seit kurzem zwei Projekte mit BBA in Straßentunneln umgesetzt:

- Tyne-Tunnel [fogtec 2009]
- Dartford-Tunnel

Tyne-Tunnel:

Die Tyne-Tunnel in der Region von Newcastle Upon Tyne bieten einen Übergang unter dem Fluss Tyne zwischen der Stadt Jarrow am Südufer mit North Shields und Howdon auf der Nordseite der Tyne. Die Querung besteht aus einem 1951 eröffneten Fußgänger- und Radfahrertunnel, sowie zwei seit 1967 bestehenden Straßentunneln im Verlauf der A19. Im Jahr 2010 wurde der New-Tyne-Straßentunnel eröffnet. Das Verkehrsaufkommen durch die Tunnel beträgt derzeit 38.000 Fahrzeuge pro Tag, mit einer prognostizierten Steigerung bis zum Jahr 2021 auf 43.000 Fahrzeuge pro Tag.

Mit der Entscheidung zur Installation einer BBA zur Brandunterdrückung zum Schutz des Straßentunnels mit einer Länge von 3,2 km ist das Projekt New-Tyne-Tunnel zu einem Vorreiter im Bereich Tunnel-Brandschutz in Großbritannien geworden, das die aktuelle britische Gesetzeslage und auch die europäischen Standards übertrifft. Die Entscheidung zur Investition beim New-Tyne-Crossing-Projekt wurde nach Empfehlung einer Expertengruppe aufgrund einer quantitativen Risikobewertung und einer Kosten-Nutzen-Analyse getroffen. Laut der Studie rentieren sich die Investitions-

kosten einer festen BBA über die Lebensdauer des Projekts.

Sowohl der neue Straßentunnel als auch die bestehenden Tunnel sind mit BBA auf Wassernebelbasis ausgestattet worden. Die geschützten Bereiche sind insgesamt in 130 Abschnitte von je 25 m Länge unterteilt. Im Falle eines Brandes werden drei benachbarte Abschnitte gleichzeitig aktiviert. Als Düsen werden ausschließlich offene Systeme verwendet, um in allen aktivierten Abschnitten die volle Durchflussrate und somit die maximale Wirkung des Wassernebels vom Beginn der Aktivierung an zu erzielen. Bemessungsgrundlage waren 1:1 Brandversuche mit LKW-Bränden [fogtec 2009].

Dartford-Tunnel:

Die Dartford-River-Crossing-Tunnel befinden sich 26 km östlich vom Londoner Zentrum und verbinden Dartford am Südufer der Themse mit Thurrock auf der Nordseite. Die Querung der Themse als Teil der Londoner Ringautobahn M25 bestehend aus zwei Straßentunneln und der Queen Elizabeth II-Brücke wird täglich von rund 150.000 Fahrzeugen passiert. Die beiden Tunnel haben eine Gesamtlänge von 1,43 km. Der erste Tunnel wurde im Jahr 1963 für den Verkehr eröffnet, der zweite Tunnel folgte im Jahr 1981.

Die Highways Agency hat beschlossen, von 2010–2012 ein stationäres Hochdruck-Wassernebel-System nachzurüsten, um im Falle eines Brandes den Schutz der Verkehrsteilnehmer, des Wartungspersonals sowie des Notfall-Servicepersonals zu erhöhen [fogtec 2010].

Island

In Island existieren keine BBA in Straßentunneln, auch sind solche nicht geplant oder im Bau, da aufgrund der geringen vorhandenen Verkehrsdichte (Jahresdurchschnitt in den meisten Tunneln < 1000 Fahrzeuge pro Tag) nur ein geringes Unfallrisiko besteht [Haraldsson 2010].

Italien

In Italien ist derzeit (Stand Anfang 2011) nur ein Tunnel, der Virgolo-Tunnel im Verlauf der Brenner-Autobahn, mit einer Wassernebelanlage ausgerüstet. Im Rahmen des durch die EU geförderten Forschungsprojektes UPTUN (siehe Kapitel 4.8.) wurde zunächst ein Teilabschnitt des 887 m langen Tunnels als großmaßstäbliche Demonstrationseinrichtung mit einer Wassernebelanlage ausgestattet. Aufgrund der erfolgreich verlaufenen Demonstration wurde anschließend im Rahmen einer Aufrüstungskampagne der Sicherheitseinrichtungen der gesamte Tunnel mit einer Hochdruck-Wassernebelanlage nachgerüstet [Häggkvist 2009].

Darüber hinaus erwägt der lokale Betreiber eines Tunnels im Raum Veneto den Einbau eines Wassernebel-systems.

Niederlande

Im Bereich von Straßentunneln sind in den Niederlanden zwei Projekte mit Brandbekämpfungsanlagen umgesetzt worden. Beide Projekte befinden sich im Verlauf der neugebauten Autobahn A73 im Südosten der Niederlan-

de und wurden 2009 eröffnet. Es handelt sich in beiden Fällen um zweiröhrige Tunnel mit Richtungsverkehr, welche mit einer Längslüftungsanlage ausgestattet sind:

- Roer-Tunnel (Länge 2.450 m)
- Swalmen-Tunnel (Länge 400 m)

Die Entscheidung zugunsten der Installation von Brandbekämpfungsanlagen in den beiden Tunnel erfolgte 2003 aufgrund eines Beschlusses des Niederländischen Ministeriums für Transport, öffentliche Arbeiten und Wasserwesen (Rijkswaterstaat). Ziel war die Vermeidung

- großer LKW-Brände,
- einer Ausbreitung des Feuers in Luftströmungsrichtung (downstream) im Falle von Verkehrsstaus im Tunnel,
- von Explosionen bei Tanks als BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion = Gasexplosion einer expandierenden, siedenden Flüssigkeit).

Anfänglich (2004-2005) wurde eine Pilotanlage mit „Compressed Air Foam“ (CAF) geplant und ausgeschrieben. Eine CAF-Anlage besteht aus einem Standardsystem auf Wasserbasis, welches zusätzlich Eingänge für Druckluft und einen Schaumbildner hat, um als Löschmittel Schaum zu erzeugen. Das Design der CAF-Anlage wurde im Verlauf der Projektierung mehrfach modifiziert, um eine optimale Schaumverteilung zu erreichen. 2005 wurde es im Runehamar-Tunnel bei 150–200 MW Brandversuchen getestet.

Die hohen Kosten für die Installation führten jedoch im Jahr 2006 zur Entscheidung des Niederländischen Ministeriums, die Entwicklung der CAF-Anlage nicht weiter zu verfolgen, sondern eine Wassernebellöschanlage zu verwenden. Die Pumpen des in den Jahren 2007 und 2008 installierten Systems sind in 3 Räumen untergebracht, die Hauptleitungen und Verteilerventile befinden sich in den Service Tunneln. Insgesamt sind im System 10.000 Düsenköpfe und 25 km Edelstahlverrohrung verbaut [Aquasys 2010].

Die Installation der BBA ist als zusätzliche Sicherheitseinrichtung vorgesehen, ohne andere nach Vorschriftenlage in niederländischen Tunneln vorgesehene Sicherheitsmaßnahmen zu ersetzen [Meijer 2008, Both 2010; Jonker 2010; PIARC 2008, Lemaire 2008].

Norwegen

In Norwegen sind zwei Tunnel mit einer BBA ausgestattet:

- Fløifjell-Tunnel (Länge 3,2 km, durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung (DTV) 26.000 Fahrzeuge, zwei Tunnelröhren)
- Vålreng-Tunnel (Länge 800 m, DTV 37.000 Fahrzeuge, zwei Tunnelröhren)

In beiden Tunneln kommt als Löschmittel Wasser ohne Zusätze zum Einsatz. Die Leitungen sind als Trockensysteme konzipiert, um bei den lokal im Winter auftre-

tenden niedrigen Temperaturen eine Vereisung der Leitungen zu vermeiden.

Ausschlaggebend für die Installation einer BBA im Vålreng-Tunnel waren aufgetretene Probleme mit der Tunnelabdichtung, die nachträglich mit Injektionen aus Polyurethan gelöst wurden. Zum Schutz des unter Brandschutzaspekten kritischen Abdichtungssystems wurden in der Folge Sprühwasserdüsen installiert.

Im Fløjfell Tunnel wurde ein Sprühflutsystem aufgrund einer Forderung der Feuerwehr eingebaut. Die Verantwortlichen hatten danach die Wahl zwischen den Alternativen in Form einer Tunnelauskleidung mit dem Produkt "Etafoam" auf Spritzbetonbasis oder dem Einbau eines Löschsystems im Tunnel. Die Erfahrungen zeigen Probleme mit Eisbildung in den Wintermonaten sowie eine hohe Zahl an Fehlalarmen des Systems (70 Fehlalarme innerhalb von einem Halbjahr, Stand 1999) [PIARC 1999].

Nach aktueller Recherche (Stand Januar 2012) sind zwischenzeitlich keine weiteren Tunnel in Norwegen mit BBA ausgestattet worden. Die Erfahrungen bei den oben genannten Projekten werden, begründet durch hohe Instandhaltungskosten und Probleme beim Frostschutz, tendenziell negativ bewertet [Grov 2012].

Österreich

In Österreich werden zwei Löschanlagen in Tunneln betrieben (Stand 2011):

- Felbertauern-Tunnel
- Mona-Lisa-Tunnel in Linz

Die Verantwortung für den Einbau und Betrieb einer BBA liegt in Österreich beim Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), welches schlussendlich die Freigabe des Tunnels erteilen muss. Auch hier wird die Auffassung vertreten, dass eine BBA den Sicherheitsstandard heben und auf Basis einer Sicherheitsanalyse möglicherweise andere sicherheitsrelevante Einbauten ersetzen kann (z. B. fehlende Fluchtwege, größere Abstände zwischen Querschlägen, Bauwerksschutz usw.). Primär ausschlaggebend ist, ob der Betreiber die Vorschläge des Planers akzeptiert. Anschließend erfolgt das Genehmigungsansuchen beim BMVIT [Sturm 2010].

Felbertauern-Tunnel:

Der Felbertauerntunnel ist ein alpiner Tunnel auf 1.650 m Seehöhe bestehend aus einer im Gegenverkehr befahrenen Tunnelröhre mit einer Länge von 5,3 km und verfügt über ein Querlüftungssystem. Grund für die Installation einer Wassernebelanlage waren die oberhalb der Zwischendecke angeordneten Zuluftkanäle, die bereichsweise als Fluchtweg genutzt werden. Dieses Konzept erfordert einen besonderen Schutz der Zwischendeckenkonstruktion.

Im Felbertauerntunnel besteht besonderer Bedarf zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus, da der Tunnel einen außergewöhnlich kleinen Querschnitt und aufgrund der Alpenquerung über 5,3 km eine hohe Druckdifferenz

zwischen den Portalen aufweist. Diese Randbedingungen führen zu hohen Luftgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s, was insbesondere in Kombination mit Gegenverkehrsbetrieb problematisch ist. Die Aktivierung des Löschsystems erfolgt automatisch nach einer einstellbaren Verzögerung, falls das Betriebspersonal nicht in den Prozess eingreift. Die Aktivierung löst drei Sektionen mit insgesamt 100 m Länge gleichzeitig aus [PIARC 2008].

Das System verfügt über zwei Pumpenräume, die Hauptleitungen und Abzweigventile (diverter) sind in den Frischluftkanälen angeordnet. Insgesamt sind 8.000 Sprühköpfe und 20 km Edelstahlrohrleitungen vorhanden [Aquasys 2010].

Mona-Lisa-Tunnel:

Der Mona-Lisa-Tunnel in der Nähe von Linz ist ein mit Gegenverkehr betriebener Tunnel mit einer 775 m langen Röhre und einem Längslüftungssystem. Aufgrund einer Ampelanlage im Bereich eines Tunnelportals kommt es häufig zu Verkehrsstaus innerhalb des Tunnels. Als Konsequenz daraus wurde beschlossen, eine Wassernebel-Löschanlage gemäß „Klasse I“ der NFPA 750 zu installieren. Das System ist mit einem selbsttätigen Branddetektionssystem verbunden, welches automatisch Feuerwehr und Rettungsdienste verständigt. Die Entscheidung über die (z. Zt. ausschließlich manuelle) Auslösung des Löschsystems liegt bei der Feuerwehr. Die Installation einer Fernauslösung ist innerhalb der kommenden Jahre geplant. Aufgrund der im Bereich der Stadt Linz vorhandenen kalten klimatischen Verhältnisse waren geeignete Frostschutzmassnahmen bei der Umsetzung der BBA mit Wasser als Löschmittel erforderlich [PIARC 2008].

Die Realisierung der Wassernebelanlage erfolgte in den Jahren 2003/2004 im Rahmen eines Demonstrationsprojektes der Fa. Aquasys [Aquasys 2010].

Rumänien

Es bestehen keine Erfahrungen und Planungen zur Ausstattung von Straßentunneln mit fest installierten Brandbekämpfungsanlagen [Arghirou 2010].

Schweden

In Schweden sind zwei Tunnel mit BBA ausgestattet [Häggkvist 2009]:

- Tegelbacken-Tunnel
- Klara-Tunnel

Das System im Tegelbacken-Tunnel wurde nach einem Bericht aus dem Jahr 1999 einmal unter Realbedingungen aktiviert und hat dabei einwandfrei funktioniert. Trotz der Installation der BBA ist der Tunnel für den Transport gefährlicher Güter gesperrt. Die BBA arbeitet als Sprühflutsystem und wird abschnittsweise durch Temperatursensoren aktiviert. Es sind keine besonderen Probleme bei der Wartung aufgetreten [PIARC 1999]. Neuere Erfahrungsberichte liegen nicht vor.

Beim Tunnelprojekt „Norra Länken“ (voraussichtliche Inbetriebnahme 2015) in Stockholm wird der Einbau einer BBA geplant. Da in Schweden keine Vorschriften bestehen, die eine Installation von BBA in Straßentun-

neln vorschreiben, bestehen auch keine Vorgaben bezüglich des Designs der BBA. Die im Tunnel Norra Länken geplante Anlage konnte daher frei im Hinblick auf Kosteneinsparungen für die speziellen Randbedingungen des Projekts entwickelt werden.

Das geplante System ist nicht als neue Standardausstattung in zukünftigen schwedischen Straßentunnel gedacht. Der Einsatz wird ausschließlich in Tunneln mit erhöhten Sicherheitsanforderungen, beispielsweise langen Tunneln, Tunneln mit Gefahrguttransporten oder in staugefährdeten innerstädtischen Tunneln mit Längslüftung zum Einsatz kommen. Im Norra-Länken-Tunnel liegen alle zuvor genannten Randbedingungen vor [Lundström 2011].

Spanien

In Spanien sind bislang zwei Tunnelprojekte mit Wassernebelanlagen ausgerüstet worden:

- Vielha-Tunnel in den Pyrenäen, Provinz Lleida im Nordosten Spaniens
- M30-Tunnel in Madrid

Vielha-Tunnel:

Der neue Vielha-Straßentunnel, eröffnet im Dezember 2007, ist als Ersatz für einen bestehenden Tunnel gebaut worden, der zukünftig nur noch als Fluchttunnel und für Gefahrguttransporte genutzt wird. Der Neubautunnel hat eine Gesamtlänge von 5.200 m bei variierenden Neigungen (550 m mit +1,7% und 4.680 m mit -4,5%) und wird im Gegenverkehrsbetrieb mit drei Fahrstreifen auf insgesamt 14 m Breite betrieben. Das Lüftungssystem arbeitet nach dem Prinzip der Halb-Querlüftung und ist in vier Lüftungssektionen unterteilt. Diese sind mit an den Portalen angeordneten Lüftungsstationen verbunden. Im Abstand von 400 m sind Querschläge zu dem als Fluchttunnel dienenden Bestandstunnel angeordnet.

Die Auslösung der BBA erfolgt ausschließlich manuell per Fernsteuerung durch die Tunnelbetriebszentrale. Derzeit ist die Auslösung erst vorgesehen, wenn alle Tunnelnutzer und Rettungsdienste den Brandbereich verlassen haben. Des Weiteren wird die Auslösung des Löschsystems mit dem Branderkennungs- und Lüftungssystem koordiniert.

M30-Tunnel in Madrid:

Die M30 bildet den inneren Autobahnring von Madrid und stellt mit insgesamt ca. 56 km Tunnellänge bislang eines der größten innerstädtischen Straßentunnelprojekte in Europa dar. Das Projekt wurde zwischen September 2004 und Sommer 2007 realisiert. Teile der Tunnel sowie technische Betriebsräume sind durch Wassernebel-Systeme der Hersteller Fogtec und Marioff geschützt.



Abbildung 3: M30, 4-streifiger Abschnitt und Lage im Autobahnnetz um Madrid [Wikipedia]

Ungarn

In Ungarn sind derzeit keine automatischen Brandbekämpfungsanlagen installiert oder geplant. Die ablehnende Haltung wird mit den Veröffentlichungen der PIARC in den vergangenen Jahren (siehe [PIARC 1999]) begründet [Horvath 2010].

Bei einem Tunnel im Verlauf der Autobahn M6 wurde die Installation eines fest installierten Löschsystems auf Schaumbasis durch die Feuerwehr angeregt, jedoch im Planungsprozess verworfen. Man hat sich ausschließlich auf den Einsatz konventioneller und mobiler Löschsysteme beschränkt.

3.1.2 Amerika

USA

Derzeit sind in den USA sechs Tunnel mit automatischen Brandbekämpfungsanlagen ausgerüstet. Die Entscheidung zugunsten der Installation der BBA in diesen Tunneln basiert auf der Überlegung, die Durchfahrt von Gefahrguttransporten zuzulassen sowie die Bauwerke oberhalb der Tunnel zu schützen [Häggkvist 2009]:

- Boston Massachusetts CANA Northbound und CANA Southbound^{*)}
- Seattle Washington Battery Street,
- I90 First Hill Mercer Island^{*)},
- Mt. Baker Ridge^{*)},
- I-5 Tunnel^{*)}.

*) Sprühflutanlage mit Zumischung eines schaumbildenden Additivs

Kanada

In Kanada ist in Vancouver beim Project British-Columbia-George-Massey-Tunnel eine automatische Brandbekämpfungsanlage als Sprinklersystem auf Wasserbasis installiert. Der Tunnel liegt im Verlauf des Highway 99 und wurde mit einer Länge von 630 m im Jahr 1959 dem Verkehr übergeben. Es handelt sich um einen Absenktunnel mit zwei Fahrstreifen je Richtung. Die Richtungstunnel sind durch eine Betonwand voneinander getrennt [Hägkvist 2009].

3.1.3 Australien

Die in Australien vorherrschende Sicherheitsphilosophie geht davon aus, dass kleine Brände, wenn sie nicht frühzeitig unterdrückt werden, sich leicht in große unkontrollierbare Brände entwickeln können. Diese Art der Brandentwicklung tritt erfahrungsgemäß deutlich häufiger auf als ein unvermitteltes Auftreten von großen Bränden. Daher befürwortet die in Australien vorherrschende Sicherheitsphilosophie, die BBA möglichst früh auszulösen, um die volle Kapazität der BBA während der ersten Minuten eines Vorfalls einzusetzen. Dadurch wird das Wachstum des Feuers in der Anfangsphase minimiert und die Wahrscheinlichkeit einer Entwicklung zum Großbrand reduziert [PIARC 2008]. Diese positiven Faktoren überwiegen potentielle Nachteile der BBA wie Zerstörung der Rauchschiichtung, erhöhter Hitzefluss und Produktion von Wasserdampf.

In einer Reihe von Straßentunneln in Australien werden BBA wie folgt verwendet:

- BBA werden ausschließlich in Tunneln im städtischen Bereich mit signifikanter Länge installiert. Diese Tunnel sind nach 1990 eröffnet worden.
- Der Anwendungsbereich der BBA hat zusätzlich zum ursprünglich angestrebten Ziel des Bauwerksschutzes inzwischen auch den Bereich der Personenrettung mit einbezogen. Diese Änderung / Erweiterung beschränkt sich ausschließlich auf Tunnel mit

Tabelle 1 enthält eine Übersicht von Straßentunneln in Australien, welche mit automatischen Brandbekämpfungsanlagen ausgerüstet sind.

- Kontrollraum mit Operatoren, die nicht ausschließlich für das Verkehrsmanagement zuständig sind, sondern auch für die Sicherheit im Tunnel.
- Videokameras und/oder automatische Unfalldetektion, welche dem Operator eine unverzügliche und präzise Lokalisierung sowie Einschätzung des Ereignisses ermöglicht [Hägkvist 2009].

- Alle Tunnel-Ventilationssysteme, welche in dieser Art vorgesehen sind, sind zumindest teilweise mit einem Rauchabzugsystem ausgestattet.

Burnley-Tunnel

Der Burnley Tunnel ist 3,4 km lang und hat je Röhre und Richtung drei Fahrstreifen. Im Tunnel verkehrt eine Mischung aus PKW- und Schwerlastverkehr. Die Lüftungsanlage arbeitet als Querlüftungssystem mit Rauchgasabsaugung. Als BBA ist eine Sprühflutanlage installiert.

Die Erfahrungen, die im Zusammenhang mit einem Brandunfall im Jahr 2007 gemacht wurden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Durch einen Verkehrsunfall am 23. März 2007, bei dem drei Menschen ums Leben kamen, wurde ein Brand ausgelöst. Die Detektion erfolgte mittels digitaler Bildauswertung und löste zwei Minuten nach der Zündung des Brandes die Notfalllüftung und BBA aus. Das System arbeitete einwandfrei, durch zügiges Erreichen der Grenzgeschwindigkeit in der Luftströmung konnte eine Rauchgasrückströmung (Backlayering) vermieden werden. Der Brand wurde bis zum Eintreffen der Feuerwehr kontrolliert, so dass keine ausgeprägte Brandweiterleitung auftrat. Am Bauwerk traten nur geringe Schäden auf. Personenschäden waren ausschließlich auf das Unfallgeschehen zurückzuführen, es gab keine Opfer infolge des Brandes.

Tunnelbezeichnung	Ort, Baujahr	Länge	Beschreibung
Lane Cove Tunnel	Sydney, 2007	3,6 km	zwei Röhren, 2 & 3 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
M5 East	Sydney, 2002	4 km	zwei Röhren, 2 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
Cross City Tunnel	Sydney, 2006	2 km	zwei Röhren, 2 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
Sydney Harbour Tunnel	Sydney, 1992	2,8 km	zwei Röhren, 2 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
Eastern Distributor	Sydney, 2000	2,1 km	zwei Röhren, 2 & 3 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
Burnley Tunnel	Melbourne, 2000	3,4 km	3 Fahrstreifen, Sprühflutanlage 10 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig) Auslösung erfolgt über 2 Zonen a 30 m
Kemp Place Tunnel	Brisbane, ~1980	0,5 km	Gegenverkehrsbetrieb (1 Fahrstreifen je Richtung), Sprühflutanlage, 5 mm/min (keine Gefahrguttransporte zulässig)
Inner City Bypass (Tunnel A)	Brisbane, 2006	0,6 km	zwei Röhren, 3 Fahrstreifen, Sprühflutanlage mit Schaumzusatz (aufgrund von Gefahrguttransporten), 6,5 mm/min
Inner City Bypass (Tunnel B)	Brisbane, 2006	0,3 km	zwei Röhren, 2 Fahrstreifen, Sprühflutanlage mit Schaumzusatz (aufgrund von Gefahrguttransporten) 6,5 mm/min.
Inner Northern Busway	Brisbane, 2008	1,2 km	Gegenverkehrsbetrieb von Busspuren mit unterirdischen Haltestellen, Sprühflutanlage ausschließlich an den Haltestellen der Station, 10 mm/min. Individuelle Zonen decken die einzelnen Haltestellen ab
Southern Crossing Tunnel Adelaide Hills	Adelaide		
North/South Busway Tunnel	Brisbane, 2004		
City Link, Mitcham / Frankston Tunnel	Melbourne		
N/A North/South Tunnel			
Graham Farmer Tunnel	Perth		
M5 East Tunnel	Sydney		
M4 Tunnel			
M7 Clem Jones Tunnel	Brisbane, 2010	4,8 km	zwei Tunnelröhren mit je 2 Fahrstreifen
Airport Link	Brisbane, 2011 im Bau befindlich	6,5 km	

Tabelle 1: Straßentunnel in Australien mit BBA [Bagis 2010], [Hägkvist 2009]

3.1.4 Asien

Japan

In japanischen Straßentunneln werden BBA, in der Regel Sprühflutanlagen, auf der Grundlage nationaler Normung eingesetzt. Die Klassifizierung der Tunnel erfolgt nach Verkehrsstärke und Tunnellänge. BBA sind für Tunnel der Klasse A (ab 10 km Länge) und B (ab 3 km Länge und mehr als 40.000 Fahrzeuge/Tag) vorgeschrieben.

Seit Ende der 70-iger Jahre sind mehr als 80 Tunnel mit Löschanlagen ausgestattet worden. Ausgangspunkt dieser Entwicklung war ein Massenunfall mit Brandfolge im Nihonzaka-Tunnel am 11. Juli 1979. Hier waren insgesamt 187 Fahrzeuge involviert und 7 Tote zu beklagen. In der Regel sind Systeme installiert worden, bei denen das Löschwasser im System permanent unter Druck steht. Einzige Ausnahme hinsichtlich des Löschmittels ist der 9,5 km lange Trans-Tokyo-Bay-Tunnel, welcher mit einer Spühflutanlage mit Option zur Schaumbeimischung ausgestattet ist. Ziel der BBA ist der Bauwerkschutz durch Verminderung der auftretenden Temperaturen und die Verbesserung der Evakuierungsbedingungen [Hägglkvist 2009, Iwata, 2001].

Erfahrungen in Japan:

Die Erfahrungen im Zusammenhang mit den BBA lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Jahr 1999 traten zwei Brände in Unterwassertunneln des Tokioter „Metropolitan Expressway“ auf. Die Brände wurden verursacht durch einen Lieferwagen und einen mittelgroßen LKW. In beiden Fällen wurden die im Tunnel installierten BBA durch den Tunnel-Operator aktiviert.
- Auswertungen von Videoaufzeichnungen von Bränden in Tunneln bestätigen die Annahme, dass die BBA nicht in der Lage sind, Fahrzeugbrände vollständig zu löschen. Die Auswertungen belegen jedoch auch die wirksame Verhinderung der Brandausbreitung und den positiven Effekt der Kühlung des Bauwerks.
- Nach den langjährigen japanischen Erfahrungen kann davon ausgegangen werden, dass die Installation von BBA in Tunneln in keinem Fall sicherheitsrelevante Nachteile zur Folge hat. Die Entscheidung bei einem bestimmten Tunnel-Projekt hat sich generell auf die japanischen Sicherheitsstandards und Kosten-Wirksamkeitsbetrachtungen zu stützen.
- Die Zeitverzögerung bis zur Aktivierung einer BBA hängt von der Entscheidung des Tunnelbetreibers ab. In der Vergangenheit wurden in einigen Fällen die BBA unverzüglich nach Entdeckung des Feuers aktiviert. In anderen Fällen wurde sie erst eingeschaltet, nachdem der letzte Verkehrsteilnehmer die Tunnelröhre verlassen hatte, um die Verletzungsgefahr durch heißen Wasserdampf auszuschließen. Die Entscheidung wird vom Tunnelbetreiber in Abhängigkeit einer Einschätzung der besseren Überlebensumstände getroffen. Zwischenzeitlich wird

eine ordnungsgemäße Aktivierung der Anlage mittels einer Risikoanalyse festgelegt [PIARC 2008].

Generell werden in Japan keine schaubildenden Zusätze verwendet, um Kosten und erhöhten Reinigungsaufwand nach dem Einsatz zu vermeiden. Die Wasserversorgung ist auf eine Einsatzzeit von mindestens 40 Minuten ausgelegt. Regelmäßige Inspektionen und Testauslösungen werden jährlich ausgeführt. Es wurden keine beachtenswerten Schäden durch Alterung an den Installationen der Sprühanlagen festgestellt [Ingason 2006].

In Japan existieren jedoch auch kritische Bewertungen zur Effektivität von Sprinkleranlagen. Yoshikazu Ota, OTA Engineering, Chiyoda Engineering Consultants Co., Ltd., anerkannter japanischer Experte im Bereich Lüftung und BBA, war seit den 1960er Jahren mit dem Design vieler BBA in Japan beauftragt. Er bezweifelt in einer Stellungnahme ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis der BBA aufgrund hoher Installations- und Wartungskosten.

Nach seiner Auffassung muss die Leistung des Belüftungssystems bei Einbau einer BBA unter Umständen erhöht werden, um aerodynamische Verluste auszugleichen, die auf Wassertropfen und Wasserdampf zurückzuführen sind. Investitionen in passive Brandschutzmaßnahmen und aktive Sicherheitsmaßnahmen zur Verbesserung der Evakuierung erscheinen ihm sinnvoller als der Einbau von BBA. Aufgrund dieser Einschätzung sieht er als Planer keine BBA mehr als Sicherheitsausrüstung in Tunneln in Asien vor [Ota 2010].

Taiwan

In Taiwan wird die Entscheidung über die Verwendung von BBA im Einzelfall getroffen.

Im Fall des East-Coast-Freeway-Tunnels in Taiwan (Inbetriebnahme 2006), eines der größten Straßentunnelprojekte im ostasiatischen Raum, wurde seitens des für das Sicherheitskonzept verantwortlichen Projektträgers, der Taiwanese Highway Authority, keine BBA in der Sicherheitsausrüstung vorgesehen [Ota 2010]. Diese Entscheidung beruhte nach Angaben eines an der Planung beteiligten japanischen Ingenieurbüros auf folgenden Aspekten:

- Die nationalen taiwanesischen Vorschriften enthalten keine entsprechenden Forderungen für den Einbau einer BBA.
- Die Kosteneffektivität der Installation einer BBA in Taiwan wird auf Basis japanischer Erfahrungen weiterhin als ungeklärt angesehen. Eine Abwägung der Kosten für Installation und Wartung im Verhältnis zur erzielten Wirkung reicht als Entscheidungsgrundlage nicht aus.
- Der Tunnel verfügt über ein leistungsfähiges Ventilationssystem.
- Sowohl der Tunnel als auch die Ausstattung weisen einen hohen Temperaturwiderstand auf.

Süd-Korea

Das Sicherheitskonzept in Süd-Korea orientiert sich an den japanischen Richtlinien. Dementsprechend werden BBA in Tunneln der Klasse A vorgesehen [Ota 2010].

3.1.5 Weitere Staaten

Ägypten

In Ägypten sind keine BBA in Straßentunneln im Einsatz oder in Planung. Vorhandene Installationen beschränken sich auf Sprinklersysteme in Geschäfts- und Verkaufsbereichen.

Abu Dhabi

In Abu Dhabi ist beim Tunnel-Projekt Yas Island Southern Crossing ein Niederdruck-Sprühflutsystem eingebaut worden. Der 698 m lange Straßentunnel verbindet die Insel Yas Island mit dem Festland. Ursprünglich war zur Sicherstellung des geforderten Sicherheitsniveaus ein in 5 Zellen unterteilter Querschnitt geplant (2 Röhren für Straßenverkehr, 1 Bahntunnel und 2 Evakuierungstunnel). Von den Verkehrstunneln in die Evakuierungstunneln waren im Abstand von 100 m Durchgänge mit Brandschutztüren, entsprechend den Vorgaben des UK Design Manual for Roads and Bridges (BD78/99) vorgesehen. Auf Basis einer Risikoanalyse konnte durch den Einsatz einer Niederdruck-Sprühflutanlage bei gleichem Gefahrenpotential ein Verzicht auf die Evakuierungstunnel und die dadurch bedingte Verlängerung der Fluchtwege als zulässig bewertet werden. Unter Berücksichtigung von beidseitig des Flusses erstellten Rettungsschächten ergibt sich eine maximale Fluchtweglänge von 294 m. Da diese Fluchtweglänge nach Risikoanalyse als zulässig bewertet wird, konnte der Tunnelquerschnitt auf 3 Zellen (2 Straßentunnelröhren und 1 Bahntunnel) reduziert werden [Tarada 2009].

3.2 Sonstige Nutzung

Indirekte Anwendung von BBA in Straßentunneln zur Rauchgaskühlung

Im Österreichischen Gleinalm-Tunnel auf der Pyhrnautobahn A9 Linz–Graz, wird eine Wassernebelanlage zur Rauchgaskühlung eingesetzt. Der Gleinalmtunnel ist ein 1-röhriger Gegenverkehrstunnel mit einer Gesamtlänge von 8.320 m, der mit Querlüftung betrieben wird. Es existieren 6 Lüftungsabschnitte mit 6 Zuluft- und 6 Abluftmaschinen (Axialventilatoren), 2 Lüftungskavernen sowie 84 Abluftklappen.

Die Bestandsventilatoren aus dem Errichtungsjahr 1978 sind auf eine Temperaturbelastung von 250°C über einen Zeitraum von 60 min ausgelegt. Gemäß gültiger RVS müssen aber Rauchgastemperaturen bis 400°C über einen Zeitraum von 120 min beherrschbar sein. Daher ist es notwendig, die Ablufttemperatur im Abluftkanal vor den Ventilatoren zu begrenzen. Dies erfolgt im Brandfall durch Einbringung von Wassernebel in den Rauchgasstrom zwischen den Rauchgasklappen und den Axialventilatoren. Durch die Verdampfung des Wassernebels in den heißen Rauchgasen wird dem Luft-

strom Wärme entzogen und die Temperatur gesenkt [Aquasys 2010b].

Anwendung in Bahntunneln

Betuwe-Route (Niederlande):

Ein Beispiel für den Einsatz einer Wassernebelanlage in einem Bahntunnel sind die Tunnel der Betuwe-Route in den Niederlanden. Die Betuwe-Route ist als Verbindung für Frachtverkehr zwischen Deutschland und dem Hafen von Rotterdam vorgesehen. Auch Gefahrguttransporte sind auf der Strecke zugelassen, Personenverkehr ist dagegen nicht geplant. Die durchgängig zweigleisige Strecke beinhaltet fünf Tunnel sowie eine Schieneneinhausung mit Richtungsverkehr.

Ziele der Installation der BBA in Kombination mit anderen Sicherheitsmaßnahmen sind:

- eine Reduzierung der Temperatur im Umfeld eines brennenden Tankwaggon mit dem Ziel ein LPG-BLEVE (Liquefied Petroleum/Propane Gas = Autogas, Boiling liquid vapor explosion = Gasexplosion einer expandierenden siedenden Flüssigkeit) zu verhindern,
- das Verhindern von Betonabplatzungen im Brandfall,
- eine Verminderung der Rauchgasentstehung in der Umgebung der Portale.

Risikoanalysen belegen, dass alle Sicherheitsanforderungen auch ohne Einsatz von Wassernebelanlagen durch Einsatz alternativer Maßnahmen, wie zusätzliche Ventilation hätten eingehalten werden können [Both 2010].

SAFE-Stationen im Eurotunnel:

Der Eurotunnel ist ein Eisenbahntunnel zwischen Frankreich (Calais) und Großbritannien (Dover), bei dem sämtliche Straßenfahrzeuge auf Shuttlezügen durch den Tunnel transportiert werden. Insofern sind die Randbedingungen hinsichtlich Brandentstehung vergleichbar mit einem Straßentunnel.

In den Jahren 1996 und 2008 traten zwei Brände mit großen Schäden an der Tunnel-Konstruktion (Tübbingauskleidung) auf. 1996 musste der betroffene Tunnelabschnitt für sieben Monate gesperrt werden, 2008 blieb die vom Brand betroffene Röhre für mehrere Wochen gesperrt. Auch wenn keine Opfer zu beklagen waren, wurde aufgrund der hohen eingetretenen wirtschaftlichen Verluste ein auf einer Wassernebelanlage basierendes Brandschutzkonzept entwickelt, um zukünftige Brandereignisse abmildern zu können.

Die Temperaturen im Tunnel erreichten bei den Bränden in den Jahren 1996 und 2008 bis zu 1000°C und führten zu kritischen Schäden an der Betontunnelschale. Feuerwehreinheiten, die 2008 den Löschangriff durchführten, konnten sich dem Brandherd nicht ausreichend nähern. Somit konnten sie nicht verhindern, dass 30 LKW auf dem Shuttlezug ausbrannten, da ein Großteil des Löschwassers nicht das Feuer erreichte.

Um im Brandfall eine Bekämpfung mittels Wassernebelanlage zu ermöglichen, wurden 2011 je Richtungstunnel zwei sogenannte „SAFE-Stations“ errichtet, in der der betroffene Zug im Brandfall hält. Jede dieser SAFE-Stations ist 870 m lang und bietet den maximal 800 m langen Zügen somit 70 m Toleranz beim Haltevorgang. Hitzesensoren an der Tunneldecke aktivieren die Düsen der Wassernebelanlage automatisch in einem oder mehreren Abschnitten. Jeder dieser Abschnitte ist 30 m lang und ist mit 15 Düsen auf beiden Seiten des Zuges ausgestattet.

Die Gesamtkosten für die nachträgliche Ausrüstung der Tunnel mit dem BBA-Systemen betragen ca. 20 Mio. €. Der überwiegende Teil der Kosten entfällt auf den sehr aufwendigen nachträglichen Einbau der Technikräume seitlich des Service-Tunnels. Der Querschnitt der Technikräume entspricht den Abmessungen der Querschläge [Railway Gazette].

Anwendung in Schienenfahrzeugen

Die Entwicklung der aktiven Brandbekämpfung innerhalb von Schienenfahrzeugen ist erst in den letzten Jahren stärker vorangekommen. Zuvor beschränkte sich die Thematik auf klare normative Anforderungen. Die griechische Staatsbahn hat zum Beispiel bereits Ende der siebziger Jahre ihre dieselpetriebenen Traktionsfahrzeugflotte, auf Grundlage geltender Zulassungsvoraussetzungen, mit Löschanlagen ausgestattet.

Seit einigen Jahren wird international durch konkrete Zulassungsspezifikationen auf aktive Brandschutzmaßnahmen gesetzt. Forderungen nach Brandbekämpfungsmaßnahmen in Schienenfahrzeugen bestehen beispielsweise in Großbritannien, Griechenland und Italien. Insbesondere Italien nimmt mit der Forderung nach Brandlöschsystemen schon seit vielen Jahren eine besondere Rolle im Zulassungsmarkt ein. Gemäß der Forderungen der UNI CEI 1170 müssen in Italien Technikbereiche in Zügen mit Mittel- und Hochspannungssystemen sowie Verbrennungskraftmaschinen generell mit automatischen Brandmelde- und Brandlöschsystemen ausgestattet werden. Aus diesem Grund findet man dort selbst auf 30 oder fast 40 Jahre alten Lokomotiven eingebaute Löschanlagen, auch wenn deren Effizienz im Vergleich zu modernen Systemen in Frage zu stellen ist.

Blickt man im Vergleich dazu auf den Anwendungsbereich des Fahrgastraumes, so wurden in der Vergangenheit aktive Brandschutzsysteme in Fahrzeugen ausschließlich von einzelnen innovativen Betreibern implementiert. So sind vor allem die Hamburger Hochbahn und die Metro Madrid als Vorreiter zu nennen. Beide Betreiber setzten sich mit diesem Lösungsansatz in großem Umfang auseinander und haben damit grundlegende erste Schritte für die heutige Anwendung gesetzt. Hauptgründe für die Umsetzung solcher umfangreicher Maßnahmen waren nach Aussagen der Betreiber die zahlenmäßig zunehmenden Vorfälle von Brandereignissen durch Vandalismus.

Die Hamburger Hochbahn entschied sich bereits Mitte der 80er Jahre, ein auf Niederdruck basierendes System mit Wasser als Löschmedium einzusetzen, während sich die Metro Madrid in den 90er Jahren dazu entschieden hat, mittels Hochdrucktechnik Wasser im Fahrgastraum zu vernebeln. Beide Betreiber nutzen Wasser als Medium, da die Gefährdung von anwesenden Personen dabei minimal ist. Im Falle der teilweise oberirdisch fahrenden Fahrzeuge in Hamburg wurde wegen der möglichen niedrigen Temperaturen dem Wasser ein Frostschutzadditiv zugegeben. In Madrid dagegen konnte aufgrund des vollständig im Untergrund verlaufenden Verkehrs und einem Temperaturniveau von über 0 °C in den unterirdischen Verkehrsanlagen auf derartige Maßnahmen verzichtet werden [Heyn 2010].

Derzeit (2011) laufen Überlegungen, ältere Fahrzeuge der Stadtbahn Düsseldorf mit BBA auszustatten. Ähnliche Überlegungen werden im Zusammenhang mit anderen Stadtbahnen im Ruhrgebiet angestellt. Bei der U-Bahn München werden entsprechende Anlagen bereits in einigen Fahrzeugen eingebaut.

Haltestellen in U-Bahnstationen

Im Bereich der Metro Madrid sind über 2.000 Bereiche wie z. B. Rolltreppen und technische Betriebsräume in über 200 Stationen mit Wassernebelanlagen ausgerüstet [Marioff]. Weitere BBA in Metrosystemen werden in U-Bahn-Haltestellen (z. B. Osaka, Mailand) oder im Bereich der Hauptaugänge (Helsinki) eingesetzt [Blenemann 2005].

Die Metro in Budapest hat 2 komplette U-Bahnlinien im Schienenbereich der Haltestellen sowie in technischen Räumen und Aufzügen mit Hochdruckwassernebel-Brandbekämpfungsanlagen ausgestattet [fogtec].

3.3 Bewertung und Vorbehalte

Der Einsatz von BBA wird in der Fachwelt nach wie vor kontrovers diskutiert. Ein Grund für die häufig anzutreffende fehlende Akzeptanz solcher Systeme in Tunneln ist auf die sehr unbefriedigenden Ergebnisse bei den ersten durchgeführten Experimenten, die bereits 1965 im Ofenegg-Tunnel (Schweiz) durchgeführt wurden, zurückzuführen (siehe Kapitel 4.1).

Dabei wurde unmittelbar nach der Entzündung von 1.000 l Diesel auf einer Oberfläche von 95 m² eine Sprühflutanlage aktiviert, welche eine schnelle Temperaturreduktion bewirkte. Das Feuer schien nach 10 Minuten gelöscht zu sein. Anschließend kam es jedoch zu einer Explosion von im Tunnel verbliebenen Treibstoffdämpfen, bei der drei Techniker verletzt wurden und großer Schaden am Versuchsaufbau entstand. Auch bei kleineren Bränden wurde eine starke Dampfentwicklung verzeichnet, wenn auch ohne die zuvor beschriebenen dramatischen Folgen.

Die angetroffenen Probleme (Explosionsgefahr, Dampfentwicklung) spiegeln sich in den Empfehlungen der PIARC (siehe Abschnitt 3.4) wider, welche sich zwischen 1983 (Kongress in Sydney) und 2004 durchgängig gegen die Installation von

Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln ausgesprochen hat. Obwohl die PIARC zwischenzeitlich solche Einrichtungen nicht mehr pauschal ablehnt, sondern vom Ergebnis einer Risikoanalyse abhängig macht, findet sich diese ablehnende Haltung bis heute in den meisten nationalen Richtlinien für Tunnel wider [Bettolini und Seifert 2009].

Die benannten Vorbehalte gegenüber BBA im allgemeinen bzw. Wasserebelanlagen sind mit dem heutigen Kenntnisstand jedoch abweichend und wie folgt zu bewerten:

These 1:

Wasser ohne geeignete Löschmittelzusätze kann Explosionen verursachen, wenn es bei einem Brand mit Treibstoff oder anderen chemischen Substanzen in Kontakt kommt.

Bewertung:

- Es gibt nur wenige Substanzen, die nicht für eine Brandbekämpfung mit BBA mit Wasser als Löschmittel geeignet sind. Insbesondere Diesel und Benzin stellen nach Auswertung umfangreicher Versuche keine Gefährdung dar.
- Wasserebel ist zur Brandbekämpfung in technischen Installationen und Maschinenräumen, in denen die wesentliche Gefährdung von verschiedensten Treibstoffen ausgeht, ein allgemein anerkanntes Löschmittel.
- Im Fall von Substanzen, die nicht mit Wasser gelöscht werden können, könnte der Tunnel theoretisch für Transporte mit diesem entsprechenden Gefahrgut gesperrt werden. Dazu zählen Stoffe der Gefahrgutklasse 4.3, die in Berührung mit Wasser entzündliche Gase bilden. Beispiele: Natrium, Carbid, Zinkstaub, Trichlorsilan. Nach dem derzeit gültigen ADR (Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße) ist eine Klassifizierung für die oben genannte Gefahrgutklasse nicht vorgesehen. Ein Tunnel kann in einem solchen Fall lediglich für „alle gefährlichen Güter“ (Kategorie „E“) gesperrt werden.



Abbildung 4: Piktogramm der Gefahrgutklasse 4.3 für Stoffe, die bei Kontakt mit Wasser entzündliche Gase bilden

These 2:

Es besteht das Risiko, dass ein Brand zwar weitgehend gelöscht wird, aber entzündliche Gase weiter produziert werden, woraus Explosionsgefahr resultiert.

Bewertung:

- Solange ein offenes Feuer vorhanden ist, werden entzündliche Gase unverzüglich verbrannt.

- Nachdem der Brand gelöscht ist, führt das von der BBA eingebrachte Löschmittel in Kombination mit der Tunnelventilation zu einer Verteilung von Schaddämpfen, welche z. B. aus Undichtigkeiten von Transportbehältern oder Kraftstofftanks bzw. von Lachen ausgetretener Flüssigkeiten resultieren. Dadurch werden für Explosionen kritische Gaskonzentrationen wirkungsvoll vermieden.

These 3:

Entstehender Wasserdampf kann Personen im Tunnel verletzen.

Bewertung:

Wasserdampf und damit Temperaturen von über 100 °C entsteht nur lokal begrenzt in direkter Nähe der Flammen.

- Personen, welche sich so nah am Brandherd befinden, dass sie vom dort lokal entstehenden Dampf verbrüht werden könnten, würden bereits durch Strahlungshitze des Brandes (d. h. auch ohne Dampfentwicklung) schwere Verletzungen erleiden.

These 4:

Die Effizienz eines Wasserebel-Systems beim Einsatz gegen verdeckte Brände innerhalb von Fahrzeugen ist gering.

Bewertung:

Verdeckte Brände in einem offenen Raum stellen für alle BBA gleichermaßen eine Herausforderung dar. Der Zweck einer Wasserebelanlage BBA ist:

- Verhinderung einer Brandausbreitung auf andere Fahrzeuge in der Umgebung,
- Bereitstellung besserer und sicherer Fluchtbedingungen für die Nutzer im Tunnel sowie verbesserte Einsatzbedingungen für die Feuerwehr,
- Schutz des Tunnels und der Tunnelausrüstung.

These 5:

Bei Aktivierung einer BBA (Wasserebelanlage) werden die Rauchgase abgekühlt und eine vorhandene Schichtung zerstört. Dadurch füllt sich der gesamte Tunnelquerschnitt über eine größere Länge und in kürzerer Zeit mit Rauch.

Bewertung:

- Bei einem frei ablaufenden Brand in einem Tunnel (also ohne Einsatz einer BBA) stellt sich unter günstigen Bedingungen bei ungestörter Thermik für wenige Minuten eine Rauchgasschichtung ein. Die bodennahe Zone dieser Schichtung bietet zeitlich begrenzt eine rauchgasfreie Fluchtmöglichkeit. Durch Tunnelventilation und die eintretende Abkühlung der Rauchgase an der Tunnelwandung wird die Brandrauchschichtung jedoch massiv gestört, so dass es in Abhängigkeit von der Brandgasproduktion (Feuergroße) und der Luftströmung

im Tunnel in der Regel nach wenigen Minuten auch ohne Einsatz einer BBA zu einer Verwirbelung der Rauchgase kommt. Überschreitet die Längsluftgeschwindigkeit Werte von ca. 3 m/s so werden die aufsteigenden Brandgase von Beginn an auch ohne BBA vollständig über den Tunnelquerschnitt verwirbelt und es kann sich zu keinem Zeitpunkt eine Rauchgasschichtung ausbilden [Schneider 2006].

- Die Aktivierung einer Wassernebelanlage vermischt und kühlt den vorhandenen Rauch. Gleichzeitig wird durch die Unterdrückung der Brandentwicklung weniger Rauchgas und Hitze produziert.
- Bei der Bewertung der Auswirkungen von BBA auf die Überlebensbedingungen von Tunnelnutzern, denen eine Selbstrettung in der Nähe des Brandherdes vor Auslösung der BBA nicht möglich war, sind genannten Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen. Vorteilhaft wirkt sich dabei die brandunterdrückende Wirkung der BBA aus. Demgegenüber steht der Nachteil einer unter Umständen verkürzten Zeitspanne mit vorhandener Rauchgasschichtung.

These 6:

Die Sichtweite wird durch den Einsatz einer Wassernebelanlage reduziert

Bewertung

- Auch bei einer aktivierten Wassernebel-Anlage ist trotz reduzierter Sichtweite eine ausreichende Orientierung gewährleistet. Dies konnte in zahlreichen Versuchen selbst mit Bränden von 60 MW nachgewiesen werden.
- Im Brandfall wird aufgrund der Randbedingungen in einem Tunnel die Sichtweite auch ohne Einsatz einer BBA innerhalb von kurzer Zeit stark beeinträchtigt.

These 7:

Die Instandhaltung einer Wassernebel-Anlage verursacht hohe Kosten.

Bewertung

- Eine pauschale Bewertung der Instandhaltungskosten ist nicht möglich, sondern es ist eine Betrachtung im Einzelfall unter Berücksichtigung der projektspezifischen Randbedingungen erforderlich (vgl. Anhang 6 zum Leitfaden). Aus der Auswertung vorhandener Installationen sind die tatsächlich aufgetretenen Kosten bekannt. Danach stehen die Instandhaltungskosten in einem vernünftigen Verhältnis zu den Gesamtinvestitionen und dem Nutzen der Anlage.
- Komponenten aus hochwertigem Edelstahl verfügen über eine lange Nutzungsdauer und erfordern nur einen geringen Instandhaltungsaufwand [Vuorisalo].

3.4 Internationale Regelwerke und Leitlinien

Nachfolgend wird der aktuelle Stand bezüglich relevanter Regelungen für die Sicherheitsausstattung von Tunneln dargestellt. Dabei werden zunächst jeweils allgemeine Vorschriften näher beschrieben und anschließend die Ausführungen zu Brandbekämpfungsanlagen in diesen Richtlinien und Verordnungen erläutert. Eine entsprechende Aufstellung ist zur Übersicht in Tabelle 2 wiederzufinden. Erwähnt sei bereits an dieser Stelle, dass mit Ausnahme von Japan bezüglich des Einbaus von fest installierten Löschanlagen in Straßentunneln keine gesetzlichen Regelungen oder Normen existieren [Ingason 2006].

Allegemeine Regelwerke zu Sicherheitssystemen in Form von BBA und WN-BBA aus den Bereichen Hochbau und Industrie, welche teilweise auf die Anwendung in Tunnel übertragen werden können sind u.a.:

• FM 5560: „Approval Standard for Water Mist Systems“ [FM Approvals 2009],

• TS 14972: „Water Mist Systems – Design and Installation“ [CEN European Committee for Standardization Deutsche Fassung CEN/TS 14972:2011],

• EN ISO 14847: „Rotary Positives Displacement Pumps - Technical Requirements“,

• EN 12259-1: „Components for Sprinkler and Water Spray Systems“,

• prEN 14816: „Water Spray Systems – Design and Installation“,

• 97/23/EC: „Pressure Equipment Directive“ [Europäisches Parlament und Rat 1997],

• NFPA 13: „Installation of Sprinkler Systems“ [NFPA 13]

• NFPA 20: „Standard for the Installation of Stationary Fire Pumps for Fire Protection“ [NFPA 20]

• NFPA 25: „Standard for the Inspection, Testing and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems“ [NFPA 25],

• NFPA 750: 2006: „Standard on Water Mist Fire Protection Systems“ [NFPA 750].

Europäische Tunnelbaurichtlinie

Die Europäische Union hat im Jahr 2004 die Richtlinie 2004/54/EG „über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im Transeuropäischen Straßennetz“ (sogenannte EG-Tunnelrichtlinie) mit dem Ziel einer Verwirklichung einheitlicher, hoher Schutzniveaus in Straßentunneln veröffentlicht. So wie bei vielen anderen europäischen Gesetzgebungsinitiativen, wurde jedoch auch diese bislang (Stand 2011) nicht von allen Mitgliedsländern wie vorgesehen in nationales Recht umgesetzt, da differierende Meinungen über die zu spezifizierenden Maßnahmen existieren. Frühe Entwürfe der Richtlinie waren sehr starr formuliert, die endgültige Fassung wurde aber durch mehr Freiraum für Entscheidungen flexibler gestaltet. Dadurch sind anstelle von Regellösungen auch alternative Ansätze zugelassen, wenn durch eine Risikoanalyse mindestens ein gleichwertiges Sicherheitsniveau nachgewiesen wird (siehe Anhang I, Abschnitt 1.2.1 der benannten europäischen Richtlinie).

Land	Titel	Kurzbezeichnung	Art	Herausgeber / Jahr
Australien	Fire Safety guideline for road tunnels (Brandschutz-Richtlinie für Straßentunnel)	-	Richtlinie	Guideline Australasian Fire Authorities Council (2001)
Österreich	Richtlinien und Verordnungen für den Straßenentwurf RVS 09.02.22 – Tunnelausrüstung – November 2010 RVS 09.02.51 - Ortsfeste Löschsysteme – März 2006	RVS	Richtlinie	Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV)
Frankreich	Circulaire interministerielle N° 2000- 63 DU 25 aout 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national (Inter-ministry circular n°2000-63 of 25 August 2000 relating to the Safety of tunnels in the national highways network)	Circ 2000/63A2	Verordnung	Ministry for infrastructure, transport, spatial planning tourism and the sea (2000)?
Deutschland	Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln	RABT 2006	Richtlinie	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2006)
Japan	Design Principles, Volume 3 (Tunnel) Part (4) (Tunnel Safety facilities) (Entwurfsgrundsätze, Band 3 (Tunnel), Teil 4 (Tunnelsicherheits-einrichtungen))	-	Guideline	Japan Highway Public Corporation (1998)
Korea	National Fire Safety Codes	NFSC	Vorschrift	Korean National Emergency Management Agency (2005)
	Guideline for Installation of Safety facility in road Tunnels	GIST	Richtlinie	Ministry of Construction & Transportation (2004)
Norwegen	Road Tunnels	Handbook 021	Richtlinie	Norwegian Public Road Administration (2010)
Schweden	Tunnel 2004	Tunnel 2004	Richtlinie	Swedish national road administration (2004)
UK	Design manual for roads and bridges, Volume 2 Highway structure design Section 2, Part 9, BD 78/99: Design of road tunnels (Entwurfsanleitung für Straßen und Brücken, Band 2 Entwurf Highway Bauwerke, Abschnitt 2, Teil 9, BD 78/99: Entwurf von Straßentunneln)	BD78/99	Richtlinie und Anforderung	Highway Agency (1999)
USA	Standard for road tunnels, bridges and other limited access highways (Norm für Straßentunnel, Brücken und andere Highways mit begrenztem Zugang)	NFPA 502	Norm	National Fire Protection Association (2011)
EU	Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the council (Direktive 2004/54/EC des Europäischen Parlamentes und des Rates)	2004/54/EC	Direktive	European Parliament and the Council (2004)
PIARC	Fire and smoke control in road tunnels, Road Tunnels, Assessment of fixed fire fighting systems (Brand- und Rauchbeherrschung in Straßentunneln, Straßentunneln, Beurteilung von festen Brandbekämpfungsanlagen)		Richtlinie	PIARC (1999) PIARC (2008)
UNECE	Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels (final report)			UNECE Ad hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels (2001)

Tabelle 2: Übersicht relevanter Regelungen für die Sicherheitsausstattung von Tunneln

TSI – Technische Spezifikation Interoperabilität

Am 20. Dezember 2007 wurde von der Europäischen Kommission die „Technische Spezifikation Interoperabilität“ (TSI) verabschiedet. Die TSI behandelt die „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen

transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem. Der Geltungsbereich wird in Paragraph 17 festgelegt:

„Diese TSI gilt für Tunnel auf dem Land mit schwachem Verkehrsaufkommen ebenso wie für Tunnel im Zentrum städtischer Gebiete mit einer großen Zahl von Zügen

und Fahrgästen. Mit ihr werden nur Mindestanforderungen festgelegt: die TSI-Konformität allein bietet keine Garantie für eine sichere Inbetriebnahme und einen sicheren Betrieb.

Alle mit Sicherheitsangelegenheiten Befassten haben zusammenzuarbeiten, um das angemessene Sicherheitsniveau für den betreffenden Tunnel gemäß den Bestimmungen dieser TSI und den Interoperabilitätsrichtlinien zu erreichen. Die Mitgliedstaaten sind aufgefordert, bei jeder Eröffnung eines neuen Tunnels oder dem Befahren bestehender Tunnel durch interoperable Züge zu prüfen, ob die örtlichen Gegebenheiten (einschließlich Art und Dichte des Verkehrs) zusätzliche Maßnahmen erfordern, die über die in der TSI genannten Maßnahmen hinausgehen.

Diese Prüfung kann anhand einer Risikoanalyse oder einer anderen, dem neuesten Stand der Technik entsprechenden Methode geschehen. Die Prüfungen sind Teil der Verfahren zur Ausstellung von Sicherheitsbescheinigungen und Erteilung von Sicherheitsgenehmigungen gemäß den Artikeln 10 und 11 der Richtlinie über die Eisenbahnsicherheit.“ [EU Kommission 2008]

Je nach örtlichen Gegebenheiten können die oben genannten zusätzlichen Maßnahmen sich auch auf die Installation einer automatischen Brandbekämpfungsanlage beziehen.

NFPA-Standards (National Fire Protection Association)

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 Mitglieder dieses Ausschusses sind Vertreter der Tunnelbetreiber, Wissenschaftler, Berater und andere technische Experten, so dass die im entsprechenden Ausschuss erarbeiteten Regelungen ein ausgewogenes Gleichgewicht der verschiedenen Interessensgruppen darstellen. Zudem sind viele der Mitglieder dieses Ausschusses auch Vertreter in PIARC-Komitees (Arbeitsgruppen), so dass sich das NFPA 502-Dokument und PIARC Positionspapiere (siehe unten) gegenseitig beeinflussen und zumeist im Einklang entwickeln [Brinson 2010].

Die aktuelle Neufassung der NFPA 502 aus dem Jahr 2010 behandelt wasserbasierte Brandbekämpfungsanlagen in einem eigenständigen Kapitel (9). Die Entscheidung, ob eine solche feste Anlage installiert werden muss, hängt von der Tunnelkategorie ab. Normative Verweise in NFPA 502 beziehen sich auf die technische Ausrüstung, die in folgenden Regelwerken behandelt wird [Hägkvist 2009]:

Kurzbezeichnung	Titel
NFPA 11	Standard for low, high, medium expansion foam (Norm für gering-, hoch-, mittelausdehnende Schäume)
NFPA 13	Standard for the Installation of Sprinkler Systems (Installation von Sprinklersystemen) Anmerkung: Die Norm geht auf viele Grundlagen in Bezug auf Ausstattung, Auslegung und Anforderungen ein.
NFPA 15	Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection (Feste Brandschutz-Wassersprüh-Systeme) Anmerkung: Diese Norm ist etwas spezialisierter als NFPA 13 und bezieht sich oft auf diese. Es empfiehlt sich daher die parallele Betrachtung von NFPA 13 und NFPA 15.
NFPA 16	Standard on the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems (Installation von Schaum-Wasser-Sprinklern und Schaum-Wasser-Sprühsystemen) Anmerkung: Diese Norm befasst sich nur mit gering ausdehnenden Schäumen und legt nicht fest, wo solche Systeme erforderlich sind.
NFPA 18	Standard for Inspection, Testing and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems (Kontrolle, Prüfung und Wartung von wasserbasierten Brandschutzsystemen)
NFPA 750	Standard on Water Mist Fire Protection System (Wassernebel-Brandschutzsysteme) Anmerkung: Diese Norm legt lediglich Minimalanforderungen fest. Sie ist daher weniger als Bemessungshandbuch, sondern eher als Darstellung etablierter Ingenieurpraxis anzusehen.

Tabelle 3: Übersicht NFPA Regelwerke

Positions-Papiere der PIARC

Die World Road Association (PIARC) – vormals "Permanent International Association of Road Congresses" – ist eine vom Grundsatz her unpolitische, gemeinnützige Vereinigung mit Mitgliedern in Form von Landesregierungen und Behörden sowie natürlichen Personen aus 142 Staaten. Die PIARC veröffentlicht im Konsens sogenannte Positionspapiere, die für die meisten europäischen Regierungen als Basis für ihre Ansätze bezüglich Tunnelsicherheit gelten.

Über lange Zeit nahm die PIARC eine ablehnende Haltung gegenüber Brandbekämpfungsanlagen ein. Im Positionspapier von 2008 hat sich bei der Bewertung von BBA durch die PIARC jedoch eine Wende vollzogen. Im Ergebnis kommt die PIARC zu dem Schluss, dass der Einsatz von festen Brandbekämpfungsanlagen unter gewissen Umständen sinnvoll ist.

Seit der Veröffentlichung im Jahr 2008 (sind zum Thema BBA) keine offiziellen Stellungnahmen mehr publiziert worden. Nach mündlicher Auskunft des deutschen Vertreters im Arbeitskreis C4.4 der PIARC ist im Zyklus (2008-2011) keine Veröffentlichung zum Thema BBA

geplant. Die Diskussionen halten aber unverändert an. Im 2012 gestarteten Zyklus soll ein Erfahrungsbericht erarbeitet werden (Best Practice of Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels) [BAST 2011].

UPTUN-Leitlinie

Im Zuge des europäisch geförderten Forschungsprojektes UPTUN wurde die „Leitlinie für wasserbasierte Brandbekämpfungssysteme für den Schutz von Tunneln und unterirdischen Anlagen“ [UPTUN 2008c] erarbeitet.

Die Leitlinie enthält Informationen zu Entwurf, Installation und Instandhaltung von wasserbasierten Brandbekämpfungssystemen zum Einsatz in Tunneln. Sie diskutiert diverse Aspekte von der Wasserversorgung bis zur Wasserableitung. Die UPTUN-Leitlinie bezieht sich dabei sowohl auf zuvor genannte NFPA-Normen als auch auf andere entsprechende Regelwerke. Dies sind u. a. die Normen-Teile der DIN EN 12259: Ortsfeste Löschanlagen – Bauteile [Hägglkvist 2009].

3.5 Nationale Richtlinien

Australien

Australien ist ein föderaler Staat bestehend aus Bundesstaaten. Die Bundesstaaten regeln die Gesetzgebung im Hinblick auf Tunnelsicherheit. Daher existieren keine einheitlichen, für ganz Australien geltende, gesetzliche Regelungen. Von den unabhängigen Straßen-Aufsichtsbehörden der Bundesstaaten bzw. der kontinentalen Territorien und australischen Tunnelexperten wurde diese Schwäche erkannt und als Gegenmaßnahme eine Serie von Empfehlungen (AUSTRROADS, Australien Standards) veröffentlicht. Diese sind jedoch nicht verbindlich, werden aber in der Regel im Einzelfall vertraglich vereinbart [ITA COSUF 2011].

Bulgarien

Das Ministerium für Transportwesen der Republik Bulgarien hat in einem Erlass (No.1 of 04.04.2007) die minimalen Sicherheitsanforderungen für Straßentunnel auf Nationalstraßen, die zum transeuropäischen Straßennetz gehören, festgelegt. Ergänzende Ausgaben zum Erlass folgten per „State Gazette“ (Staatsanzeiger), Ausgabe 58/2007 und Ausgabe 102/2008.

Der Erlass macht keine Festlegung bezüglich der Installation von BBA. Nach Artikel 3 des betreffenden Erlasses, ist der geschäftsführende Direktor der nationalen Straßenagentur für die Auswahl des Sicherheitskonzeptes, das auch Brandbekämpfungsanlagen umfasst, verantwortlich [Georgieva 2010].

Dänemark

In Dänemark existieren keine nationalen Richtlinien mit expliziten Forderungen bezüglich BBA. Die Vorgaben der Direktive 2004/54/EG sind in dänisches Recht umgesetzt worden [Eskesen 2010].

Finnland

Es existieren nationale finnische Richtlinien für Straßentunnel (ausschließlich in finnischer Sprache erhältlich), welche von der Straßenverwaltungsbehörde heraus gegeben werden. Danach sind sowohl Lösungen mit Was-

sernebelanlagen als auch Alternativlösungen zugelassen, nicht jedoch gefordert.

Grundsätzlich liegt in Finnland die Verantwortung für die Wahl der Sicherheitseinrichtungen beim Tunnelbetreiber (Stadt, Staat oder privater Betreiber).

Frankreich

In einem Rundschreiben vom 25. August 2000 des zuständigen französischen Ministeriums sind keine Forderungen oder Angaben zu BBA enthalten [Ministry Interior 2000], [Ministere equipement 2000].

Die Installation einer BBA wird auf Basis einer Entscheidung im Einzelfall getroffen. Das einzuhaltende Sicherheitsniveau wird durch nationale Richtlinien definiert. Das CETU (Centre d'Etudes des Tunnel) hat ein Grundlagenpapier zum Einsatz von BBA in Tunneln mit Schwerpunkt auf Wassernebelanlagen veröffentlicht [Ponticq 2010].

Großbritannien

Im Abschnitt 8.55 des „Design manual for roads“ [Highway Agency 1999] werden automatische Brandbekämpfungssysteme als nicht tauglich für Verkehrsräume bewertet. Flutungssysteme mit gasförmigen Löschmitteln und Schaumsysteme sind demnach nicht einsetzbar, wenn sich Personen in Fahrzeugen befinden. Der positive Einfluss von BBA als Sprühwasseranlagen auf Rauchgaskühlung und Rauchgaswaschung wird zwar anerkannt, aber aufgrund der möglichen Produktion explosiver Luft/Dampf-Mischungen werden die Systeme abgelehnt.

Die nach o. g. Richtlinie von 1999 nach wie vor bestehende ablehnende Haltung wird in der Praxis jedoch teilweise nicht mehr aufrechterhalten. Für die Dartford Tunnel hat die Highway Agency 2010 eine Nachrüstung mit einer Brandbekämpfungsanlage beschlossen. Auch in den (privat betriebenen) Tyne-Tunneln sind vor kurzem Brandbekämpfungsanlagen installiert worden (vgl. Kapitel 3.1.1).

Island

Die Verantwortung für die Wahl von Sicherheitsmaßnahmen im Tunnel liegt bei der isländischen Straßenverwaltung. Richtlinien werden von Ministerium für Transport und Kommunikation festgelegt. Spezielle Richtlinien bezüglich BBA existieren nicht [Haraldsson 2010].

Italien

Die nationale unabhängige Straßenbetriebsgesellschaft (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade, ANAS S.p.A.) beschreibt in ihren Richtlinien in Abschnitt 3.3.2.5 Systeme zur Schadensbegrenzung. Darin wird ausgesagt, dass verschiedene Arten von Brandbekämpfungsanlagen existieren und diese für die konkrete Anwendung einer speziellen Risikoanalyse unterzogen werden müssen, welche den Sicherheitsgrad, die Auswahl sowie die Funktion der Ausstattung bestätigt. Die Richtlinien gelten jedoch nur für Straßen, die von der Gesellschaft selbst betrieben werden [Arditi 2010].

Japan

Als eine Konsequenz aus den Brandschäden im Suzaka Tunnel hat die Feuerwehr im Jahre 1967 Standards für Highway-Tunnel angekündigt und noch im selben Jahr veröffentlicht.

Niederlande

Im Allgemeinen liegt in den Niederlanden die Verantwortung beim Betreiber des Tunnels. Da sich in den Niederlanden keine Tunnel in der Hand privater Betreiber befinden, geht die Verantwortung an lokale oder nationale Behörden über (Straßentunnel: Rijkswaterstaat RWS, Bahntunnel: prorail). Es besteht in den Niederlanden nach der aktuellen Vorschriftenlage keine grundsätzliche Forderung zum Einbau von Brandbekämpfungsanlagen. Die vorhandenen Richtlinien spiegeln im Wesentlichen die vor einigen Jahren noch ablehnende Haltung gegenüber fest installierten Brandbekämpfungsanlagen wider.

Norwegen

Die für die Sicherheitsausstattung in Straßentunneln zuständige Behörde „Statens Vegvesen“ hat im März 2010 eine überarbeitete Fassung des Handbuchs 021 „Veg-tunneler“ herausgegeben. Darin sind keine Angaben oder Forderungen zu fest installierten Brandbekämpfungsanlagen enthalten [Statens Vegvesen, Norwegen 2010].

Österreich

In Österreich ist die Tunnelausrüstung nach den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen [FSV 2011] auszubilden. Es sind keine Forderungen oder Angaben hinsichtlich BBA enthalten.

Ergänzend existiert ein Merkblatt RVS 09.02.51 – Orts-feste Löschanlagen – (März 2006) [FSV 2010], welches detailliert Schutzziele von BBA und die zugehörigen Anforderungen an Löschanlagen definiert. Des Weiteren wird in dem Merkblatt auf betriebliche Aspekte eingegangen und es werden Nachweise der Anlagenwirksamkeit genannt.

Schweden

Die in Schweden anzuwendende technische Beschreibung „Tunnel 2004“ erwähnt Sprinkleranlagen lediglich als eventuell vorzusehende Sicherheitsausstattung und verweist auf die Regelungen der NFPA 502 [Vägverket 2004].

Schweiz

Nach den Ausführungen der Tunnel Task Force, Maßnahme 3.10, beim Bundesamt für Straßenwesen (ASTRA, Stand Mai 2000) ist „der Einsatz fester Löschanlagen im konkreten Einzelfall zu prüfen“ [ASTRA 2000].

Spanien

In Spanien existieren keine nationalen Vorschriften bezüglich BBA [Del Rey 2010].

Ungarn

Es existieren in Ungarn keine nationalen Richtlinien für den Einsatz von automatischen Brandbekämpfungsanlagen. Zur Anwendung internationaler Regelungen be-

stand bislang nach Angabe der ITA Ungarn kein Bedarf [Horvath 2010].

Rumänien

In Rumänien sind die Mindestanforderungen für Tunnel als Bestandteil des transeuropäischen Straßennetzes hinsichtlich der erforderlichen Sicherheitsausstattung im Gesetz Nr. 277 vom 10. Oktober 2007 festgelegt. Dieses Gesetz setzt die Vorgaben des Europäischen Parlamentes in der Richtlinie 2004/54/EG vom 29. April 2004 um [Arghirou 2010].

Teil 4 Brandversuche

Im Folgenden soll ein Überblick zu bereits durchgeführten und veröffentlichten Brandversuchen mit Einsatz von BBA in zeitlicher Chronologie gegeben werden. Ein Grossteil weiterer Forschungsergebnisse wurde jedoch im Rahmen von Industrie-Forschungsprojekten gewonnen. Die Ergebnisse aus diesen Quellen sind in der Regel unveröffentlicht und daher nicht zugänglich.

4.1 Ofenegg-Tunnel (1965)

Im Jahre 1965 wurden im Schweizer Ofenegg-Tunnel, einem ausgedienten Bahntunnel mit lichter Höhe von 6 m und eine Breite an der Sohle von 4 m erste Tunnel-Brandversuche durchgeführt [Haerter 1994]. In 190 m Entfernung zum Portal wurde als Abschluss ein Schott im Querschnitt angeordnet. Die Brandquelle war 130 m vom Portal bzw. 60 m von der Schottwand entfernt. Es wurden zwei Reihen Sprinkler im Bereich des Brandes mit einer spezifischen Kapazität von $19 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ installiert.

Unmittelbar nach der Entzündung der Poolfeuer wurden die Sprinkler aktiviert und führten zu einer schnellen Temperaturreduktion. Nach 10 Minuten schien das Feuer gelöscht zu sein. Bei dem Versuchsaufbau mit 1.000 l Diesel kam es jedoch anschließend zu einer Explosion von im Tunnel verbliebenen Treibstoffdämpfen, bei der drei Techniker verletzt wurden und großer Schaden am Versuchsaufbau entstand. Auch bei kleineren Bränden wurden ein ähnlicher Effekt, wenn auch ohne dramatische Folgen, beobachtet. Insgesamt wurde bei den Versuchen eine starke Dampfentwicklung verzeichnet [Bettolini und Seifert 2009].

4.2 Japanische Versuchsreihen (1960-2001)

In Japan sind seit Beginn der 60-er Jahre zahlreiche Modell- und in situ Versuche zur Beurteilung der Wirksamkeit von Sprinkleranlagen in Tunneln durchgeführt worden. Nähere Ergebnisse zu den aufgeführten Versuchen liegen aber nicht vor, da die zugehörigen Berichte ausschließlich in japanischer Sprache verfasst sind.

4.3 Versuchsreihen des VTT in Finnland (1990)

Das technische Forschungszentrum von Finnland (VTT) hat 1990 Versuchsreihen mit Flüssigkeitsbränden und Wasser, ohne Einsatz schaubildender Additive ausgeführt [Kokkala 1990]. Es wurden 10 verschiedene entzündliche Flüssigkeiten mit Flammpunkten zwischen -6°C und $+234^\circ\text{C}$ in Kombination mit sieben verschiedenen Sprinkler- und Wassersprühdüsen verwendet. Die Fläche der Poolfeuer betrug zwischen $0,4 \text{ m}^2$ und 12 m^2 und der Abstand der Düsen lag zwischen 3 m und 8 m.

4.4 US-amerikanische Versuche im Memorial-Tunnel (1993-1995)

Die Versuchsreihe "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP)" umfasste insgesamt 98 Großversuche (full-scale). Die Gesamtkosten des Programms beliefen sich auf nahezu 40 Millionen US-Dollar und waren damit das umfangreichste Forschungsprojekt, das jemals von der Federal Highway Administration und dem Massachusetts Highway Department gefördert wurde.

Die Brandversuche wurden im Memorial-Tunnel, der sich ca. 80 km südlich von Charleston, West Virginia (USA) entfernt befindet, durchgeführt. Der zweispurige, 850 m lange Gebirgstunnel mit einem hufeisenförmigen Querschnitt im Verlauf der Interstate 77 mit einer Steigung von 3,2% wurde 1988 aus betrieblichen Gründen still gelegt [Sergui und Luchian].

Wesentliches Ziel der Versuche war die Untersuchung der Effektivität unterschiedlicher Ventilationssysteme und Lüftungsraten im Brandfall (simuliert mit Diesel-Pool-Feuern mit Wärmefreisetzungsraten von 10, 20, 50 und 100 MW), um daraus eine Datenbank mit Informationen zu Temperaturen und Rauchausbildung aufzubauen. Darüber hinaus sollte der Einfluss unterschiedlicher Anordnungen der Düsen, der Ventilationsbedingungen innerhalb des Tunnels und der Wärmefreisetzungsrate des Brandes auf die Wirksamkeit der verschiedenen Sprinklersysteme ermittelt werden. Von besonderer Bedeutung für die Bewertung von BBA sind fünf Versuche mit Sprinklern, bei denen dem Wasser ein schaubildender Zusatz zugefügt wurde. Hier wurde untersucht, ob eine durch hohe Luftgeschwindigkeit bei Längslüftung der Löschschaum (3% Aqueous Film Forming Foam) vom Brandort weg geweht würde.

4.5 Benelux Tunnel Tests (2001)

Unter der Schirmherrschaft des Zentrums für Tunnelsicherheit des niederländischen Ministeriums Rijkswaterstaat (RWS) wurden in Kooperation mit TNO (Centre for Fire Safety), Arcadis, Nagtglas Versteeg Inspecties und Strukton Systems im November 2001 Full-Scale-Brandversuche im Zweiten Benelux-Tunnel in Rotterdam (Niederlande) durchgeführt. Dabei wurden alle nicht benötigten Installationen zum Schutz vor Beschädigung oder Verschmutzung eingehaust oder demontiert. Zusätzlich wurde im Bereich des Brandherdes über 70 m Länge eine hitzeresistente Beschichtung aufgebracht. Insgesamt wurden in einem Zeitraum von vier Wochen 26 Brandversuche durchgeführt:

- 6 Pool Brände,
- 4 Fahrzeugbrände,
- 6 Versuche mit gestapelten Brandlasten (teils mit Abdeckplane),
- 10 Versuche zur Branddetektion.

Als Brandbekämpfungsanlage wurde eine Sprühflutanlage mit zwei Sektionen (17,5 m und 20 m Länge) im Bereich der Brandlast und im angrenzenden Downstreambereich eingesetzt. Die Wasserabgaberate betrug $12,5 \text{ l/m}^2/\text{min}$.

Hinsichtlich BBA wurden folgende Schlussfolgerungen aus den Versuchen abgeleitet:

- Bei den untersuchten Bränden trat ohne den Einsatz der BBA sowohl mit als auch ohne Längslüftung mit hoher Wahrscheinlichkeit in einer Entfernung von 100 bis 200 m downstream-seitig des Brandes eine Verschlechterung der Sichtbedingungen ein. Die Sicht der Nutzer kann dadurch so weit reduziert werden, dass Fluchtwegmarkierungen

nur noch schwer oder gar nicht mehr erkennbar sind. Der Anstieg der CO-Konzentration überschreitet nicht die zulässigen Grenzwerte.

- Ein Wassersprühsystem reduziert die Lufttemperatur im Bereich anderer Fahrzeuge nahe dem Brandortes. Bei den eingesetzten Brandlasten wären die gemessenen Temperaturen nicht tödlich gewesen und es trat kein Brandübersprung zwischen den Fahrzeugen auf. Des Weiteren wurde praktisch keine Dampfbildung festgestellt. Durch die Aktivierung der Löschanlage wird die Sichtbarkeit allerdings in einem Maße reduziert, dass Fluchtwegbeschilderungen nur mit Schwierigkeiten oder gar nicht mehr erkennbar sind.
- Die Simulation der Brandverläufe mittels CFD Berechnung liefert qualitativ ausreichende Ergebnisse. Bei quantitativer Auswertung werden deutliche Abweichungen festgestellt, welche die Notwendigkeit von Brandversuchen zur Verifizierung der Berechnungen unterstreichen [Ministry of Transport 2002].

4.6 CETU-Versuche (seit 2002)

Das französische Centre d'Etudes des Tunnel (CETU) ist die für Tunnel zuständige Organisation der französischen Regierung. Es wickelt seit 2002 ein Versuchsprogramm ab, welches hinsichtlich des Einsatzes von BBA folgende Ziele verfolgt:

- Verbesserung der Bedingungen für die Selbstrettung von Nutzern, die dazu in der Lage sind, sowie Verlängerung der Zeitspanne, in der für auf Fremdrerettung angewiesene Nutzer und die Rettungsdienste erträgliche, das Überleben sichernde Bedingungen vorherrschen.
- Verbessertes Verständnis der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge sowie einer Bewertung der Wirksamkeit von BBA.
- Verbesserung der Messverfahren wesentlicher Parameter (wie z. B. Temperatur oder Sichtweitenmessung mit Messfühlern), die fallweise vor den Wassertropfen geschützt sind oder nicht.

Das zugehörige Versuchsprogramm war zweistufig konzipiert. In Phase 1 wurden Modellversuche im Maßstab 1:3 auf dem Gelände des französischen Instituts für Bauforschung durchgeführt. Phase 2 sah die Durchführung von Großversuchen im Realmaßstab vor. Nach Angabe der Quelle wurde bis 2008 nur Phase 1 umgesetzt, weitere Veröffentlichungen sind nicht bekannt. Das Testprogramm bestand aus 30 Versuchen mit unverdeckten und teilverdeckten Bränden in Form von Heptan-Poolbränden oder Feststoffbränden aus Holzpaletten.

4.7 Versuchsstollen Hagerbach A86 (2003)

2003 wurden im Versuchstollen Hagerbach (Schweiz) Brandversuche durchgeführt, um die Effizienz einer Wassernebelanlage, projektiert für den A86-Tunnel in Paris (Frankreich), zu bewerten (siehe auch Kapitel 3.1). Dort sind die Richtungsfahrbahnen übereinander angeordnet, siehe Abbildung 5. Da im A86-Tunnel aufgrund der geringen lichten Höhe keine LKW zugelassen sind, wurden die Versuche ausschließlich mit PKW durchge-

führt. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.

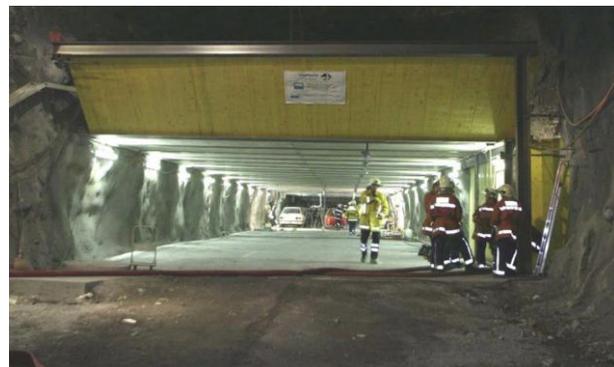
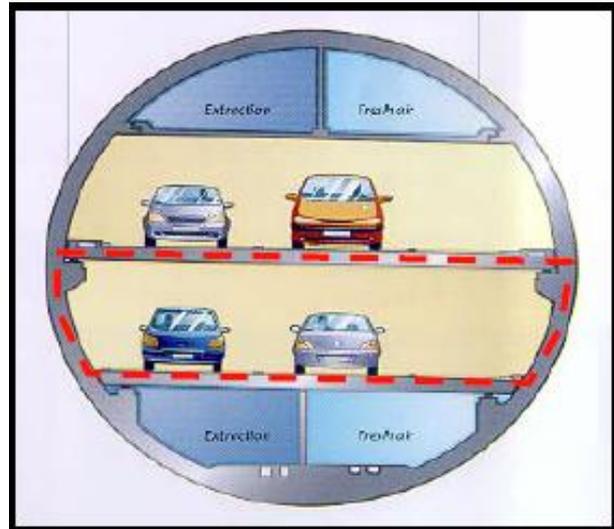


Abbildung 5: A86 Querschnitt und Nachbau bei VSH

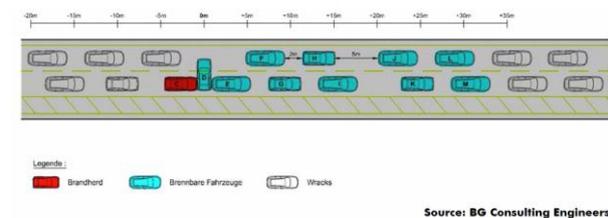


Abbildung 6: Grundriss des Versuchsaufbaus der A86-Brandversuche im Versuchsstollen Hagerbach

In zwei Serien wurden insgesamt 16 Brandversuche mit einer Mitteldruck-Wassernebelanlage (12,5 bis 35 bar) sowie einem Hochdrucksystem (> 35 bar) durchgeführt. Die Tests zielten im Wesentlichen darauf ab, die Wirksamkeit der Systeme bei der Verhinderung eines Feuerübersprungs zwischen den PKW zu bewerten [Cetu 2010]. Weiterführende Informationen und Ergebnisse der durchgeführten Versuche sind nicht veröffentlicht worden.

4.8 UPTUN (2002-2006)

Das Forschungsprojekt UPTUN (cost-effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in existing TUNnels, also kostengünstige, nachhaltige und innovative Methoden für die Nachrüstung des Brandschutzes in bestehenden Tunneln) hat neben der Grundlagenforschung auch die Verwendung von

Wassernebelanlagen in Tunneln untersucht. Das Projekt mit einem Budget von ca. 13 Mio. € wurde im 5. Rahmenprogramm (FP5) von der EU gefördert und von 2002 bis 2006 von 41 europäischen Partnern aus 14 Ländern durchgeführt.

Es wurden zwei umfangreiche Testprogramme in diesem Projekt durchgeführt, nämlich Brandversuche im Runehamar-Tunnel in Norwegen (Tunnel außer Betrieb) und im Virgolo-Tunnel in Italien (Tunnel in Betrieb). Dabei wurden auch Hochdruckwassernebel-BBA berücksichtigt. Weitere Ergebnisse wurden in Versuchstunneln in Dortmund und Oslo (Norwegen) gewonnen.

4.8.1 DMT (2004)

Im Rahmen des Projektes UPTUN wurden in der Versuchsanlage der Deutschen Montan Technologie (DMT) in Dortmund Versuchsreihen unter Verwendung aktueller Brandbekämpfungstechnologien in Straßentunneln durchgeführt. Der Testtunnel wies einen Querschnitt von $9,7 \text{ m}^2$ bei einer Länge von 150 m auf. Die Versuchsreihen wurden zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der folgenden Systeme durchgeführt [UPTUN 2008a]:

- Wasservorhang,
- Sprühflutanlage (Tropfengröße ca. 1 mm) und
- Niederdruck-Wassernebelanlage.

Als Brandquelle wurde eine in vier Abteilungen unterteilte, mit Diesel gefüllte Wanne (Poolfeuer) verwendet. Jede Abteilung der Wanne hatte eine Fläche von knapp 2 m^2 ($1,6 \times 1,2 \text{ m}$), so dass insgesamt Wärmeabsetzungsleistungen von 5 bis 20 MW erzeugt werden konnten. Die Wanne war durch eine Dachkonstruktion teilweise abgedeckt, wodurch ein PKW simuliert werden sollte (siehe Abbildung 7). Als Brennstoff wurde auf Wasser schwimmender Diesel verwendet, je nach angestrebter Testdauer zwischen 60 und 240 Litern.

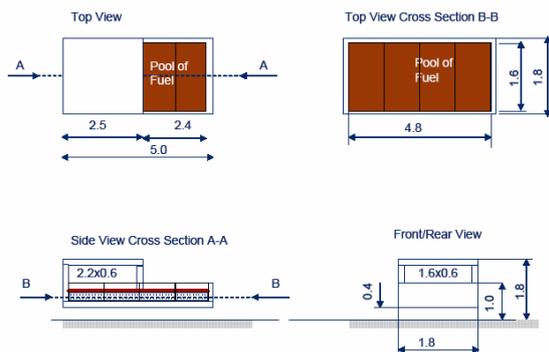


Abbildung 7: Brandlastwanne bei den UPTUN-Versuchen der DMT (2004) [UPTUN 2008a]

Bei den Tests mit der Sprühflutanlage wurde der kühlende Effekt deutlich nachgewiesen: Nach Auslösung der Löschanlage gingen die Temperaturen an praktisch allen Messpunkten im Versuchstunnel fast bis auf die Temperatur der zugeführten Frischluft zurück. Des Weiteren wurde auch bestätigt, dass Sprühflutanlagen nicht in der Lage sind, einen Brand vollständig zu löschen. Selbst bei der kleinsten untersuchten Brandlast von 5 MW flammte der Brand nach Deaktivierung der Sprühflutanlage erneut mit der ursprünglichen Geschwindigkeit auf. Die Wirksamkeit wurde durch die in der Testanlage

maximal mögliche Luftgeschwindigkeit von 3 m/s nicht erkennbar beeinträchtigt, was vorwiegend auf die Größe der von der Sprühflutanlage erzeugten Tropfen zurückgeführt wird.

Auch bei den Tests mit der Niederdruck-Wassernebelanlage, welche ca. 1/10 des Wasserverbrauches der Sprühflutanlage aufwies, wurde die Wirkung eindeutig nachgewiesen. Verglichen mit den Ergebnissen der Sprühflutanlage war der Effekt jedoch weniger ausgeprägt. Nach Auslösung der Wassernebelanlage lagen die im Deckenbereich gemessenen Temperaturen noch in einem Bereich von 100°C bis 200°C . Auch im mittleren sowie im Bodenbereich verblieben die Temperaturen auf einem höheren Niveau als bei den vergleichbaren Versuchen mit der Sprühflutanlage. Die Niederdruck-Wassernebelanlage war ebenfalls nicht in der Lage, den Brand vollständig zu löschen. Nach Abschaltung trat der gleiche Effekt der Wiederentzündung auf wie bei der Sprühflutanlage [UPTUN 2008a].

4.8.2 Versuchsreihe im Virgolo-Tunnel (2005)

Im Rahmen der UPTUN-Realbrandversuche im Virgolo-Tunnel der Brenner-Autobahn bei Bozen in Süd-Tirol wurden 2005 Brandlasten von 10, 20 und 30 MW mit Diesel-Poolfeuern erzeugt. Abbildung 8 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche, im 2. und 3. Versuch kam demnach eine Wassernebelanlage zum Einsatz [UPTUN 2005].

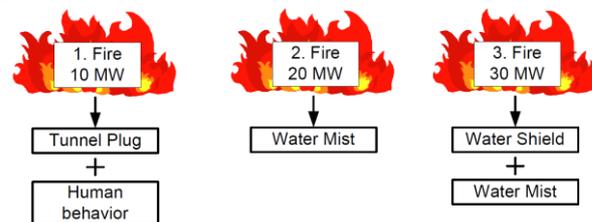


Abbildung 8: Versuchsprogramm im Virgolo-Tunnel 2005

4.8.3 IF Oslo

Ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojektes UPTUN wurden in einer Versuchseinrichtung der Versicherungsgesellschaft IF Brandversuche durchgeführt. Die Versuchseinrichtung befindet sich am Rand von Oslo (Norwegen). Der Versuchstunnel hat eine Querschnittsfläche von 40 m^2 bei einer Länge von 100 m. Es wurde die Wirksamkeit von zwei neu entwickelten, fest in Tunneln installierten Wassersprühsystemen bestimmt:

- ein Niederdruck-Wassernebel-System ($< 12,5 \text{ bar}$) sowie
- ein Hochdruck-Wassernebel-System ($> 35 \text{ bar}$).

Die Tests wurden mit Heptan gefüllten Wannen mit Brandlasten von 20 MW und mit Holzpaletten mit 15 MW Brandlast ausgeführt. Die Geschwindigkeit der Längsluft variierte zwischen 1,0 und 2,5 m/s [Cetu 2010], [UPTUN 2008b].

Die Brandversuche im Maßstab 1:1 zielten mehr auf die Brandkontrolle als auf Brandunterdrückung ab und wur-

den mit den oben erwähnten Niederdruck- und Hochdruckwassernebelssystemen durchgeführt. Als Brandszenarien kamen sowohl Flüssigkeits- als auch Feststoffbrände unter Verwendung von gestapelten Holzpaletten zum Einsatz. Bei den Versuchen mit Brandbekämpfungsanlagen wurden Brandlasten im Bereich von 10 bis 20 MW unter freien Abbrandbedingungen verwendet.

Die Versuchsergebnisse zeigten, dass beide Systeme (Niederdruck und Hochdruck) in der Lage waren, die Wärmefreisetzungsraten um 30 bis 60 % zu reduzieren. Die Wirkung der Systeme war abhängig von der Größe des Brandes, der verwendeten Sprühdüse, der versprühten Wassermenge und dem Abstand des Brandherds von der BBA. Aus den Versuchen konnte jedoch nicht abgeleitet werden, dass ein System besser geeignet war als das andere.

Nach der Aktivierung der Löschanlagen sanken die Temperaturen stromabwärts jeweils sehr schnell ab. Die Sichtbedingungen stromabwärts des Brandes wurden während der ersten Minuten nach Brandausbruch nicht verbessert. Die Reduzierung der Brandausbreitung und der Wärmefreisetzungsraten durch die Wassernebelanlage bewirkte jedoch in der Folge eine erhöhte Sichtweite. Die Aktivierung des Systems hatte stromaufwärts infolge Reduzierung der Rauchgasrückströmung (backlayering) eine Erhöhung der Sichtweite zur Folge [Hägkvist 2009].

4.9 SOLIT (2004-2006)

Das Forschungsprojekt Safety of Life in Tunnels (SOLIT) wurde im Zeitraum von Juli 2004 bis September 2006 durchgeführt. Es wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Zielsetzung des Forschungsprojektes SOLIT war die Entwicklung einer wirtschaftlichen Wassernebelanlage zur Brandbekämpfung in Tunneln, um im Brandfall

- die Evakuierungsbedingungen von Personen zu verbessern,
- eine schnelle und sichere Brandbekämpfung durch die Feuerwehr zu ermöglichen,
- eine Ausbreitung des Brandes zu vermindern und Schäden am Tunnelbauwerk zu minimieren.

Basierend auf dem abgeschlossenen EU-Forschungsprojektes „UPTUN - cost-effective, sustainable and innovative UPgrading methods for fire safety in existing TUNnels“ (vgl. Kapitel 4.8) wurde anhand von theoretischen Studien und praktischen Versuchen untersucht, wie sich verschiedene Sicherheitssysteme in einem Tunnel, wie z. B. Wassernebel mit Branderkennung oder Ventilation, gegenseitig beeinflussen. Dazu wurde ein umfangreiches Programm mit Brandversuchen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Neben diesem Versuchsprogramm wurden Methoden und Empfehlungen entwickelt, wie automatische Brandbekämpfungsanlagen in Tunnelsicherheitssysteme integriert werden können.

Im Rahmen des Projektes SOLIT wurden insgesamt 53 Großbrandversuche mit Feststoffbränden und Flüssigkeitsbränden durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind nicht im Detail veröffentlicht, Auszüge werden im öffentlichen Forschungsbericht erläutert [Kratzmeir 2008].

4.10 A73-Tests (2005-2008)

Das niederländische Ministerium für Transport, öffentliche Arbeiten und Wasserwesen Rijkswaterstaat (RWS) hat im Jahr 2005 als Pilotprojekt ein Druckluft-Schaumsystem (Compressed Air Foam = CAF-System) in zwei neuen Tunneln (Roer-Tunnel und Swalmen-Tunnel) der Autobahn A73 im Süd-Osten der Niederlande durchgeführt (siehe auch Abschnitt 3.1 – Niederlande). In diesem Zusammenhang wurden Ende 2005 auch Brandversuche im Originalmaßstab im Runehamartunnel in Norwegen durchgeführt. Die Versuchsergebnisse der getesteten CAF-Systeme wurden hinsichtlich der Löschwirksamkeit als erfolgreich bewertet [PIARC 2008].

4.11 SP-Versuche im Modellmaßstab (2006)

Im Jahr 2006 wurde bei SP in Schweden eine Modellstudie im Maßstab (1:23) durchgeführt, um das grundlegende Verständnis des Einflusses von Wassersprühanlagen in Tunneln mit Längslüftung zu verbessern (Abb. 9) [Ingason 2006].

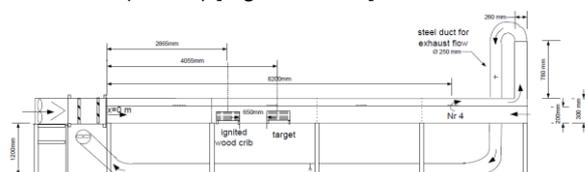


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

4.12 Building Research Establishment BRI (2006-2009)

Das Building Research Establishment in Großbritannien hat zwischen Oktober 2006 und März 2009 im Auftrag der britischen Regierung Brandversuche mit PKW in Parkhäusern durchgeführt. Obwohl sich die Versuche nicht mit Tunnelanlagen beschäftigen, sind die Ergebnisse aber dennoch interessant, da sie zumindest teilweise übertragbar sind. Sie zeigen, dass ein Brandübersprung in Parkhäusern von Fahrzeug zu Fahrzeug über Distanzen von 5 m stattfinden kann. Der Einsatz von Sprinkleranlagen hat diesen Effekt wirksam verhindert und die Ausbreitung des Feuers stark gehemmt. Dadurch wird der Einsatz der Feuerwehr zum vollständigen Löschen des Brandes erst ermöglicht [Brinson 2010; Shipp 2007].

4.13 M30 Tests in Spanien (2006)

Im Februar 2006 wurde durch den Wassernebelanlagenhersteller Marioff eine Serie von Brandversuchen im Originalmaßstab im Versuchstunnel auf dem TST-Gelände in San Pedro de Anes (Spanien) durchgeführt. Die Tests waren speziell auf die Dimensionierung der Brandbekämpfungsanlage für die M30-Autobahntunnel in Madrid ausgerichtet, welche Bereiche mit sehr breiten Strassenquerschnitten aufweist. Die Brandbekämpfungsanlage wurde in den Versuchen in Kombination mit

unterschiedlichen Tunnelbelüftungssystemen getestet. Die Ergebnisse belegen, dass unter den gegebenen Randbedingungen die drei getesteten Systeme (Sprühflut, Wasserebelanlage, und die Kombination aus beidem in einer sog. Hybridanlage) nahezu gleich wirksam arbeiten und die Brand- und Rauchentwicklung entscheidend gehemmt wird. Der Rauch konnte durch die Rauchabzugsklappen in der Decke in den Abzugskanal abgeführt werden, so dass sich ein Halbquerlüftungssystem im Rahmen der Tests als optimale Lösung erwiesen hat [Vuolle, Mawhinney 2007; Arvidson 2003].

Analog zu den zuvor genannten Versuchen wurden durch den Anlagenhersteller fogtec für das gleiche Projekt unabhängige Brandversuche bei TST (Spanien) durchgeführt. Diese Versuche, ebenfalls im Maßstab 1:1, dienten der Dimensionierung der BBA in den von fogtec ausgerüsteten Bereichen der M30 Tunnel [fogtec 2007, Fernandez 2012].

4.14 Euro-Tunnel (2010)

Für das in Kapitel 3.2 beschriebene Projekt „SAFE-Station“ im Kanaltunnel wurden 2010 umfangreiche Versuche durchgeführt.

Die Wirkungsweise der Hochdruck-Wasserebel-Anlage (HDWN) für den Eurotunnel sollte nach Vorgabe des Auftraggebers gemäß dem Stand der Technik und den aktuellen Regelwerken für Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln (z. B. UPTUN R251; NFPA 502) im Rahmen von Brandversuchen im Maßstab 1:1 nachgewiesen werden. Es ist in diesem Zusammenhang herauszustellen, dass insbesondere durch die Ventilationsbedingungen und die Größe des zu erwartenden Brandes im Eurotunnel vergleichbare Anwendungen noch nie zuvor mit Brandbekämpfungsanlagen abgesichert wurden.

Weiterhin sollte die Funktionsweise des Branderkennungs- und Lokalisierungssystems nachgewiesen werden. Aus diesem Grund wurde durch das Institut für angewandte Brandschutzforschung (IFAB) im spanischen Versuchstunnel San Pedro des Anes ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt und durch weitere Fachleute von STUVA, efectis France und SETEC begleitet. In diesem speziellen Versuchstunnel wurden der Querschnitt des Eurotunnels sowie 2 Lkw nachgebildet.

Auf einer Länge von 40 m wurden Nachbauten von Lkw aus Holzpaletten als Brandlast verwendet. Da in diesem besonderen Fall die Wirksamkeit der HDWN-Anlage bei einem Brand von mindestens 150 MW nachgewiesen werden sollte, wurde eine Zündung der Lkw-Nachbauten mit Dieselpoolfeuern mit einer initialen Brandlast von ca. 25 MW vorgenommen. Nach Erreichen bzw. Überschreiten von 150 MW wurde die HDWN-Anlage aktiviert.

Um gleichzeitig die Funktionsweise der Brandnotlüftung zu simulieren, wurde zum Zeitpunkt der Aktivierung der HDWN-Anlage eine Strömungsumkehr der Ventilation durchgeführt.

Zur Messwernerfassung der Brandversuche wurden im gesamten Versuchstunnel über 150 Sensoren zur Überwachung von Temperaturen, Wärmestrahlung, Wasserdampf, Gaskonzentrationen und Strömungsgeschwindigkeit installiert. Zur Überprüfung der Brandausbreitung wurde auf beiden Seiten der Brandlast in einem Abstand von 1,50 m als weiteres Zielobjekt ein Stapel Holzpaletten aufgestellt.

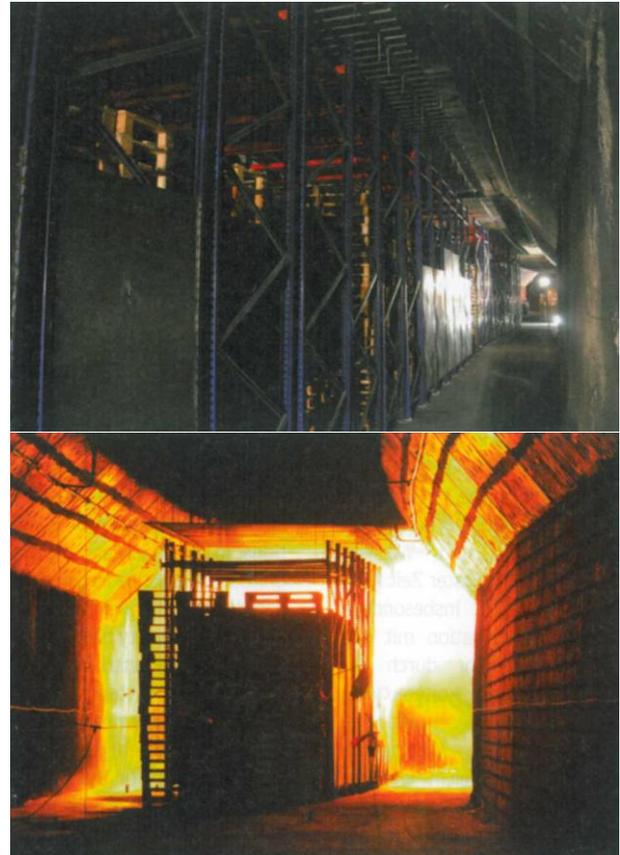


Abbildung 10: Versuchsaufbau und Brandversuch [Kratzmeir 2010]

Nach der Zündung der Initialbrandlast konnte insbesondere wegen der hohen Luftgeschwindigkeit in Tunnel längsrichtung eine sehr rasante Brandausbreitung festgestellt werden. So wurde innerhalb weniger Minuten nach Zündung eine Wärmefreisetzungsrate von ca. 200 MW erreicht. Unmittelbar nach der Auslösung der Hochdruckwasserebel-Anlage haben sich die Temperaturen und der Wärmestrahlung deutlich verringert. Insbesondere auch in Kombination mit der Strömungsumkehr durch die Brandnotlüftung konnte weiterhin eine sehr schnelle Reduzierung der Wärmefreisetzungsrate erreicht werden. Die schnelle Aktivierung der HDWN-Anlage reduziert somit die Einwirkungen des Brandes auf die Tunnelinfrastruktur und damit mögliche Schäden deutlich. Weiterhin wurde auch gezeigt, dass mit aktivierter HDWN-Anlage ein schnelles und vergleichsweise gefahrloses Eingreifen durch die Feuerwehr möglich ist [Kratzmeir 2010].

Teil 5 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

5.1 Schlussfolgerungen

Die zuvor erläuterten Anwendungen in der Praxis zeigen, dass in der jüngeren Vergangenheit mehrere unterschiedliche Systeme für Brandbekämpfungsanlagen entwickelt worden sind und für den Einsatz in Tunneln zur Verfügung stehen. Des Weiteren sind umfangreiche Brandversuche durchgeführt worden, um die Systeme zu testen und die jeweiligen Vor- und Nachteile zu ermitteln.

Im Folgenden sind die wichtigsten Schlussfolgerungen der durchgeführten Literaturrecherche zusammengefasst. Sie basieren auf den in diesem Bericht zitierten Unterlagen und Angaben bezüglich der Nutzung von BBA in Tunneln.

- BBA werden im Allgemeinen nicht mit dem Ziel eingesetzt, den Brand vollständig zu löschen. Sie sind hierzu bei einem voll entwickelten Brand in der Regel nicht in der Lage. Vornehmliches Ziel ist es vielmehr, bis zum Eingreifen der Feuerwehr den Brand so zu kontrollieren oder einzudämmen, um der Feuerwehr einen Brandangriff überhaupt erst zu ermöglichen.
- Die BBA und das Ventilationssystem müssen aufeinander abgestimmt werden und sich in ihrer Wirkung auf Brand- und Rauchausbreitung gegenseitig unterstützen.
- Eine Rauchgasschichtung wird unter den in einem Tunnel vorherrschenden Bedingungen meist innerhalb von vergleichsweise kurzer Zeit zerstört, unabhängig davon, ob eine BBA zum Einsatz kommt.
- Der günstigste Aktivierungszeitpunkt einer BBA sollte im Rahmen einer Risikoanalyse ermittelt werden. Die Steuerung der BBA sollte durch die Tunnelbetriebszentrale erfolgen und durch die Feuerwehr nachgeregelt werden können.
- Der Einsatz einer BBA verzögert die Brandentwicklung und reduziert so im Brandfall die Wärmefreisetzungsrate und vermindert durch Hitze und Verbrennung entstehende Schäden. Daraus resultieren nach Brandereignissen geringere Kosten für die Behebung von Bauwerksschäden und kürzere Betriebsausfallzeiten.
- BBA verhindern eine Brandausbreitung auf benachbarte Fahrzeuge und können dadurch Leben von Menschen retten, die sich nicht aus der Nähe des Brandes evakuieren können.
- Brände in Fahrzeugen entstehen meist in Folge von mechanischen oder elektrischen Fehlfunktionen. Auslaufende Flüssigkeiten bilden nur selten die Primärursache.
- Flüssigkeitsbrände können durch Einsatz von Wassersprüh- oder Wassernebelanlagen mit kleinerer Tropfengröße bekämpft werden. Kleine Tropfen kühlen den Brand effektiv, ohne beim Auftreffen den flüssigen Brandstoff zu verspritzen oder durch Lachenbildung zu verteilen.

Bisher existieren keine festen Regeln für den Einbau und die Aktivierung von BBA. Die Vor- und Nachteile solcher Systeme müssen im Einzelfall bei jedem Projekt auf der Basis einer projektspezifischen Risikoanalyse beurteilt werden. Dabei ist ein ausgewogenes Kosten-Nutzen-Verhältnis anzustreben. Darüber hinaus ist eine effektive Integration der Anlage in das gesamte Sicherheitskonzept und die Ausstattung des Tunnels erforderlich.

5.2 Forschungsbedarf

Trotz der umfangreichen bislang durchgeführten Brandversuche mit BBA besteht bei folgenden Fragestellungen weiterhin Forschungsbedarf (Stand 2010, zum Zeitpunkt der Durchführung der primären Statusanalyse⁴):

- Grundsätzliche Interaktion von Brandrauch, Lüftung und Löschmittel
- Mathematische Modellierung und Validierung des Gesamtsystems unter Einbeziehung der BBA mittels numerischer CFD-Simulation
- Bestimmung und Erweiterung der Anwendungsgrenzen von CFD-Modellierungen
- Ermittlung des optimalen Lüftungssystem (Längslüftung, Querlüftung, Halbquerlüftung) in Kombination mit einer BBA unter den spezifischen Randbedingungen verschiedener Tunneltypen zur Gewährleistung eines optimalen Personen- und Sachschutzes
- Einfluss und Optimierung der Düsenausbildung und der Tropfengröße auf die Wirkung der BBA hinsichtlich Evakuierungsbedingungen
- Einfluss und Potential einer individuell auf die jeweils vorliegende Brandsituation abgestimmten Steuerung der Wasserfreisetzung, um die Nachteile, z. B. hinsichtlich Zerstörung der Rauchgasschichtung, zu minimieren
- Optimierung des Anlagendesigns
- Minimierung der Wartungskosten
- Auswirkungen auf die Personenrettung (Sichtbedingungen, Luftqualität, Rauchgaswaschung, Verbesserung der Einsatzbedingungen für die Feuerwehr)
- Optimierung des Auslösezeitpunktes (automatisch oder manuell durch Feuerwehr bzw. Betriebszentrale; vor, nach oder während der Evakuierung)
- Potentielle Interaktion mit gefährlichen Gütern
- Optimierung der Düsenanordnung
- Potential der Kosteneinsparung durch Minimierung der Bauwerksschäden und der Tunnelausfallzeiten.

Die Statusanalyse (AP2) wurde hauptsächlich zu Beginn der Projektlaufzeit von SOLIT2 als Basis für alle anderen Arbeitspakete erstellt.

⁴ Die Hauptarbeiten zur Statusanalyse wurden zu Projektbeginn durchgeführt. Zum Projektende und auch danach (Stand November 2012) wurden in den vorangehenden Kapiteln teilweise auch aktuelle Informationen eingepflegt.

Auf diverse der oben genannten Fragestellungen werden durch das Projekt SOLIT2 Antworten geliefert. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes SOLIT2 sind im Hauptdokument (Leitfaden) und den zugehörigen Anhängen veröffentlicht. Grundsätzlich besteht aber bei allen Versuchsergebnissen die Problematik einer eingeschränkten Übertragbarkeit von auf andere Randbedingungen, wie Tunnel und Löschanlagen.

Teil 6 Quellenverzeichnis

6.1 Abbildungen

Soweit nicht anders angegeben, liegen die Rechte der Abbildungen bei den an diesem Dokument beteiligten Partnern des Forschungskonsortiums. Bei Verwendung anderer Abbildungen findet sich ein Verweis auf die vollständige Quellenangabe in der Abbildungsbeschreibung. Die Verwendung erfolgt auf Basis des UrhG §51 Nr.1.

6.2 Referenzen

- Arditi (2010), E-Mail. 23.08.2010. STUVA, Survey on fixed fire fighting systems.
- Arghirou (2010), E-Mail. 25.10.2010. STUVA, ITA Survey on fixed fire fighting systems in Romania.
- Arvidson, Magnus (2003), Alternative Fire Sprinkler Systems for Roadway Tunnels SP report 2004:05, SP Fire Technology.
- ASTRA (2000), Bundesamt für Strassen, Schweiz, Tunnels Task Force. Schlussbericht, 13th Australien Tunneling Conference. 23.05.2000.
- Aquasys (2010), High Pressure Water Mist System for Road Tunnels, Linz, 28.06.2010
- Aquasys (2010b). Vortrag: Rauchgaskühlung Gleisaltunnel, Sicherheit und Belüftung von Tunnelanlagen, Graz. 04.05.2010.
- Bagis (2010), E-Mail. 01.09.2010. STUVA, List of Australian FFFS Tunnels.
- BAST (2011), Telefonat. 24.01.2011. STUVA, PIARC Technical Committee C4.4.
- Bettelini, M. und N. Seifert (2009), ITA, Automatic fire extinction in road tunnels. State of the art and practical application. 2009, Budapest World Tunnel Congress.
- Blennemann, Friedhelm (2005), Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV. Fire protection in vehicles and tunnels for public transport, Blaue Buchreihe des VDV 11, Alba-Fachverlag, Düsseldorf.
- Both (2010), E-Mail. 23.08.2010. STUVA, Survey on fixed fire fighting systems.
- Brinson, Alan (2010), Active Fire Protection in Tunnels, in Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, edited by A. Lönnermark, and H. Ingason.
- CEN European Committee for Standardization (Deutsche Fassung CEN/TS 14972:2011). TS - Technical Specification, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Feinsprüh-Löschanlagen - Planung und Einbau(DIN CEN/TS 14972). Deutsche Fassung CEN/TS 14972:2011.
- Cetu (2010), Water Mists in Road Tunnels. State of knowledge and provisional assessment elements regarding their use.
- Del Rey (2010), E-Mail. 25.08.2010. STUVA, Survey on fixed fire fighting systems.
- Eskesen (2010), E-Mail. 11.10.2010. STUVA, ITA Survey on fixed fire fighting systems.
- EU Kommission (2008). Entscheidung der Kommission, TSI Eisenbahntunnel Entscheidung über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem(Aktenzeichen K(2007) 6450). 7.3.2008.
- Europäisches Parlament und Rat (1997), 97/23/EC Pressure Equipment Directive.
- Femern Sund (2011), Consolidated Technical Report, Draft 2011, Online Adresse: <http://www.femern.com/material-folder/documents/2011-publications/consolidated-technical-report>, Zugriff am 26.04.2012
- Fernandez, S.; Del Rey, Ignacio (2012), Large Scale Fire Tests for the "Calle 30 Project", in ISTSS 2012.
- FM Approvals (2009), Approval Standard for Water Mist Systems(FM 5560). March 2009.
- fogtec, Fogtec protection of M4 Metro Line in Budapest, Online Adresse: http://www.fogtec-international.com/news/PDF/1204_News.pdf, Zugriff am 25.07.2012.
- fogtec (2007), Fogtec Fire suppression System put into operation in M30 Tunnels of Madrid.
- fogtec (2009), Tunnel news Sept. 2009. Protection of New Tyne Crossing by Fogtec high-pressure water mist technology, Zugriff am 12.11.2010.
- fogtec (2010), Dartfort River Crossing. Themse-Querung von Londons Ringautobahn M25, Zugriff am 27.05.2011.
- FSV (2010). Merkblatt, RVS 09.02.51 - Merkblatt Tunnelausrüstung Löschsysteme, Ortsfeste Löschsysteme(09.02.51). 01.06.2010, FSV.
- FSV (2011), RVS 09.02.22 - Tunnelausrüstung(09.02.22). 01. November 2011, FSV.
- Georgieva (2010), E-Mail. 08.10.2010. STUVA, Survey on fixed fire fighting systems, Bulgarien.
- Grov (2012). 10.02.2012. STUVA, Installation of fixed Fire fighting Systems in Norwegian road tunnels.
- Haack, A. (2007), STUVA, Tunnel Fixed Fire Suppression Systems. Symposium Introduction and Overview. 2007, Las Vegas.
- Haerter, A. (1994). Vortrag: , Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965, Fires in Tunnels, SP Conference - Borås, Sweden, Borås, Sweden. 10-11 October 1994.
- Hägglkvist, A. (2009), Luleå University of Technology, Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels. An overview of current research, standards and attitudes. 03.11.2009, Lund.
- Haraldsson (2010), E-Mail. 11.10.2010. STUVA, ITA Survey on fixed fire fighting systems.
- Heyn, J. (2010), Brandschutz in Schienenfahrzeugen, ZEVrail, 134(6-7).
- Highway Agency (1999), Design manual for roads and bridges, Design of road tunnels (BD 78/99, Volume 2, Section 2, Part 9). August 1999.
- Hjelm, E., H. Ingason, und A. Lönnermark (2010). SP (Ed.), Effective Firefighting Operations in Road Tunnels(SP Report 2010:10). 2010, Boras.
- Horvath (2010), Brief. 13.09.2010. STUVA, Survey fixed fire fighting systems.
- Ingason, H. (2006). SP Technical Research Institute of Sweden (Ed.), Model Scale Tunnel Fire Tests. Brandforskprojekt 406-021(56). 2006.
- ITA COSUF (2011), Updated survey of existing regulations and recognised recommendations. (operation and safety of road tunnels). 21.07.2011.
- Iwata, H., and Y. Ota (2001). Vortrag: , Tokyo-wan Aqualine - Experience of Traffic and Safety. Tokyo Bay Tunnel, 1st International Conference on Traffic and Safety in Road Tunnels, Hamburg. 28/29.05.2001.
- Järvinen (2010), E-Mail. 08.09.2010. STUVA, Survey on fixed fire fighting systems.

- Jonker (2010), Brief. 27.09.2010. STUVA, Answers Netherlands for state owned road tunnels.
- Kokkala, M. (1990), Technical Research Centre of Finland, Espoo, Extinguishment of liquid fires with sprinklers and water sprays analysis of the test results. 1990.
- Kratzmeir, S. (2008), Safety of Life in Tunnels, Forschungsbericht SOLIT - Wasserebelanlagen in Strassentunneln. 26.02.2008.
- Kratzmeir, S. (2010), Brandschutz im Eurotunnel, Tunnel(7), Seite 33–36.
- Lemaire, A., and V. J. A. Meussen (2008), Effectis Nederland, Effects of water mist on real large tunnel fires: Experimental determination of BLEVE-risk and tenability during growth and suppression. June 2008.
- Le Parisien (2011), Premier feu dans le tunnel de l'A86, Online Adresse: <http://www.leparisien.fr/abo-seine-et-marne-sud/premier-feu-dans-le-tunnel-de-l-a86-23-12-2010-1201668.php>, Zugriff am 20.01.2011.
- Lundström (2011), E-Mail. 27.04.2011. STUVA, Norra Länken.
- Marioff, Referenzen Wasserebel Systeme, Online Adresse: http://www.marioff.com/references/transportation/en_GB/transportation/, Zugriff am 01.06.2011.
- Märkische Allgemeine Zeitung online (2012), One-Seven stattet Thueringer Poerzbergtunnel mit automatischer Brandschutzanlage aus, http://www.maerkischeallgemeine.de/cms/ziel/604050/DE?article_id=2276217, Zugriff am 20.10.2011.
- Mawhinney, R. N. (2007), Hughes Associates, Computational Fluid dynamics modelling of water mist systems on large HGV fires in tunnels. 2007.
- Meijer, G. J. und Meeussen, M. P., New development for a fixed fire fighting system in road tunnels, Tunnel 5/2008, S 52-54
- Ministere de l'équipement (2000), Circulaire interministérielle N° 2000- 63 du 25 aout 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national(EQR001042C). 25.08.2000.
- Ministry of the Interior (2000), Ministry of Establishment, Transport and Housing, France, Appendix 2 to inter-ministry circular no 2000-63 of 25 August 2000. Technical instruction relating to safety measures in new road tunnels (Design and Operation).
- Ministry of Transport (2002), Directorate-General for public works and water management, Project "Safety Test". Report on fire tests. 08.2002, Netherlands.
- NFPA 25, Standard for the Inspection, Testing and Maintenance of Water-Bases Fire Protection Systems.
- NFPA 20, Standard for the Installation of Stationary Fire Pumps for Fire Protection.
- NFPA 750, Standard on water mist fire protection systems, National Fire Protection Association, Quincy, Mass.
- NFPA 13, Installation of Sprinkler Systems 2010.
- Ota (2010), E-Mail. 17.08.2010. STUVA, ITA Survey on fixed fire fighting systems.
- PIARC (1999), Technical Committee on Road Tunnel, Fire and smoke control in road tunnels(05.05 B). 04.10.1999.
- PIARC (2008), Technical Comittee 3.3 Road Tunnel Operation, Road Tunnels, an assessment of fixed fire fighting systems(2008R07)
- Ponticq (2010), E-Mail. 08.12.2010. STUVA, Survey on fixed fire-fighting systems.
- Railway Gazette, Eurotunnel demonstrates €20m suppression system, Online Adresse: <http://www.railwaygazette.com/nc/news/single-view/view/eurotunnel-demonstrates-EUR20m-fire-suppression-system.html>, Zugriff am 16.02.2011.
- Schneider, Ulrich; Horvath, Johannes (2006), Brandschutz-Praxis in Tunnelbauten. Brandverhalten, Brandschutzmaßnahmen, Sanierung, ISBN 3-89932-037-9, Bauwerk-Verlag, Berlin.
- Sergui, F., und P. E. Luchian, Parsons Brinkerhoff, The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Programme.
- Shipp, M. (2007). Vortrag: , Fires in enclosed Cap Parks. 11.01.2007.
- Solit2 (2009), Safety of Life in Tunnels 2. Vorhabensbeschreibung Verbundprojekt 19S9008D. 2009.
- Statens Vegvesen Norwegen (2010), Håndbok 021 Vegtunneler. März 2010, Norwegen.
- Sturm (2010), E-Mail. 24.08.2010. STUVA, Survey on fixed fire figting systems.
- Tarada, F. (2009), Emerging trends in tunnel fire suppression, Eurotransport(5), 43–49.
- UPTUN (2005), "Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNNels", D62 Real Scale Tunnel Fire Tests Virgolo Tunnel. 03.10.2005.
- 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.
- UPTUN (2008a), "Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNNels", D231 Evaluation of Current Mitigation Technologies in Existing Tunnels. 09.2008.
- UPTUN (2008b), "Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNNels", D241 Development of new innovative technologies. 09.2008.
- UPTUN (2008c), "Cost effective sustainable and innovative UPgrading Methods for Fire Safety in existing TUNNels", D252 Engineering Guidance for Water Shield Mitigation System for the Protection of Tunnels and SubSurface Facilities. 09.2008.
- Vägverket (2004), Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av tunnlar ATB Tunnel 2004. 25.11.2004, Schweden.
- Vuolle, P., Water mist concept, effective choice for improving safety in road tunnels.
- Vuorisalo, M., Marioff Corporation Oy, Water mist concept for road and rail tunnels.