SOLIT Safety of Life in Tunnels

Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung

am Beispiel von wasserbasierten Brandbekämpfungs-anlagen

Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum SOLIT² Forschungsvorhaben, erstellt durch das SOLIT² Forschungskonsortium

Unterstützt durch:

ITA COSUF
ITA Committee on Operational Safety of Underground Facilities

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.

Die vorliegende Veröffentlichung wird von ITA – COSUF als wertvoller Beitrag für die Verbesserung der Betriebssicherheit in unterirdischen Anlagen anerkannt. ITA – COSUF hat die Einzelheiten und herangezogenen Quellen nicht vollständig geprüft und kann daher nicht alle Inhalte dieser Veröffentlichung uneingeschränkt bestätigen. Der vorliegende Leitfaden wird von ITA – COSUF jedoch als hilfreich für den technologischen Fortschritt sowie als förderlich für Entwicklungen und Diskussionen angesehen und wird daher von ITA – COSUF unterstützt.

Der Lenkungskreis des ITA COSUF

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 am Beispiel von wasserbasierten Brandbekämpfungsanlagen

Für diesen Leitfaden sind die folgenden Anhänge verfügbar:
Anhang 1: Statusanalyse
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 Ingenieure 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 Piazolla

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 (Projektträger Mobilität und Verkehr), Robert Sauter (ADAC e. V.).

Herausgeber:
SOLIT² Forschungskonsortium, bestehend aus:
BUNG Ingenieure 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: 2.1; 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 Vorbemerkungen 6
1.1 Einführung ... 6
1.2 Allgemeiner Aufbau ... 6
1.3 Begriffserklärungen ... 6
1.4 Weitere Normen und Regelwerke ... 7
1.5 Quellen ... 7
Teil 2 Grundlagen 8
2.1 Anwendungsbereich ... 8
2.2 Schutzziele und Stand der Technik ... 8
2.2.1 Personenschutz ... 8
2.2.2 Schutz des Bauwerkes ... 9
2.2.3 Unterstützung der Fremdrettung und Brandbekämpfung ... 11
2.2.4 Reduzierung volkswirtschaftlicher Kosten und Erhöhung der Verfügbarkeit ... 11
2.3 Nachrüstung von Tunneln ... 12
2.4 Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln ... 12
2.4.1 Anlagentypen ... 12
2.4.2 Die Wirkung von BBA in Tunneln ... 15
2.4.3 Bewertung der Eignung einer BBA für einen spezifischen Tunnel ... 22
2.4.4 Einsatz von BBA bei Gefahrgut ... 26
2.5 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von Brandschutzeinrichtungen ... 28
2.5.1 Grundlagen zu Bemessungsbrände ... 28
2.5.2 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von baulichen Brandschutzmaßnahmen ... 29
2.5.3 Bemessungsbrände zur Dimensionierung der Brandfalllüftung ... 29
2.5.4 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von BBA ... 30
2.6 Grundlagen zur Kompensation von Sicherheitssystemen. ... 32
2.7 Methoden der Sicherheitsbewertung ... 32
2.8 Grundlagen der Ermittlung von Lebenszykluskosten (LZK) bei Tunnelbauwerken ... 34
2.8.1 Systematik ... 35
2.8.2 Methoden zur Berechnung von LZK ... 38
Teil 3 Methodischer Ansatz und Mindestanforderungen zur Bewertung der Kompensationsmöglichkeiten 40
3.1 Kompensationspotenzial ... 40
3.1.1 Selbstrettungsphase ... 41
3.1.2 Fremdrettungsphase und Brandbekämpfung ... 42
3.1.3 Bauwerksschutz ... 42
3.1.4 Weitere Effekte ... 43
3.2 Grundsätzliches Vorgehen bei der Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen ... 43
3.2.1 Kompensation bei Nutzerschutz (Fluchtwegabstände, Brandfalllüftung) ... 43
3.2.2 Kompensation bei Fremdrettungs- und Brandbekämpfungsmaßnahmen ... 44
3.2.3 Kompensation von baulichen Brandschutzmaßnahmen ... 44
3.2.4 Weitere Kompensationsmöglichkeiten und zusätzlicher Nutzen ... 45
3.3 Nachweis der gleichen Sicherheitsniveaus von Ausstattungsvarianten ... 46
3.3.1 Grundsätzliches ... 46
3.3.2 Bewertung der Sicherheit von Ausstattungsvarianten ... 47
3.3.3 Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten ... 47
3.3.4 Ermittlung des Schadenausmaß ... 48
3.3.5 Risikoermittlung ... 49
3.3.6 Risikobewertung ... 49
3.4 Simulationsmodelle zur Verwendung in Nachweisverfahren ... 50

3.4.1 Strömungs- und Ausbreitungsmodelle 50
3.4.2 Flucht- und Evakuierungsmodelle 51
3.5 Verwendung multikriterieller Entscheidungssysteme zum Vergleich von Ausstattungsvarianten auf Basis von Lebenszykluskosten 53
3.5.1 Allgemeines 53
3.5.2 Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) 53
3.5.3 Erarbeitung von Bewertungskriterien 53
3.5.4 Sensitivitätsanalyse 54
3.6 Mindestanforderungen an ortsfeste BBA in Tunneln 55
3.6.1 Auswahl der Anlagentechnologie 55
3.6.2 Nachweis der Wirksamkeit 58
3.6.3 Technische Ausführung 59
3.6.4 Integration 59
3.6.5 Anforderungen an RAMS von Ausrüstungsgegenständen des Tunnelsicherheitssystems 59
3.7 Anforderungen an die Dokumentation, Überprüfung und Begutachtung 60
Teil 4 Quellenverzeichnis 61
4.1 Abbildungen 61
4.2 Literatur 61
4.3 Weiterführende Literatur 62

Folgende Anhänge sind als separate Dokumente erhältlich:

Anhang 1: Statusanalyse
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

Teil 1 Vorbemerkungen

1.1 Einführung

Der vorliegende Leitfaden soll Ingenieuren und anderen mit dem Brandschutz in Straßentunneln vertrauten Personen eine Methodik zur Verfügung stellen, Bestandteile eines Tunnelsicherheitssystems, ganzheitlich zu betrachten, zu bewerten und zu planen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Einbeziehung von stationären Brandbekämpfungsanlagen (BBA) und den sich daraus ergebenden Wechselwirkungen mit anderen Sicherheitsmaßnahmen. Ausgehend von der Darstellung der technischen Grundlagen wird aufgezeigt, wie der mögliche Einsatz einer BBA bewertet und wie eine BBA geplant werden kann.

Ausgangspunkt ist dabei das Sicherheitsniveau, welches durch länderspezifische Vorschriften und anerkannte Regeln der Technik festgelegt wird. Beispielhaft wird dies an den deutschen „Richtlinien zur Ausstattung und zum Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) verdeutlicht, wobei die grundsätzlichen Methoden und Verfahren im Fokus stehen. Damit ist die Übertragbarkeit auf die in anderen Ländern geltenden Vorschriften und den daraus resultierenden Verfahren gewährleistet.

Dieser Leitfaden zeigt auf, wie technisch aufwändige und damit oft kostenintensive Maßnahmen durch andere, effizientere Maßnahmen – hier insbesondere durch den Einsatz einer BBA – ersetzt bzw. kompensiert werden können („Kompensation“). Ziel ist dabei, durch die sinnvolle Kombination von einzelnen Maßnahmen, abhängig von der konkreten Ausgestaltung eines Bauwerkes, die Sicherheit für Personen, den Schutz des Bauwerks oder die Verfügbarkeit eines Tunnels bei einem ähnlichen Kostenniveau zu verbessern bzw. das gleiche Sicherheitsniveau mit geringeren Kosten zu realisieren.

Neben der Darstellung und der Bewertung der Wirksamkeit der einzelnen Schutzmaßnahmen beschreibt der Leitfaden Verfahren für eine ganzheitliche Bewertung und die dafür notwendigen Mindestanforderungen.

1.2 Allgemeiner Aufbau

Der Leitfaden ist ein Ergebnis des SOLIT²-Forschungsprojektes, welches vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Beschluss des Deutschen Bundestages gefördert wurde. In diesem Leitfaden werden für mit der Materie vertraute Ingenieure und Fachplaner Methoden und Mindestanforderungen beschrieben, um eine ganzheitliche Planung eines Tunnelsicherheitssystems zu erarbeiten und dessen Wirksamkeit und ökonomischen Nutzen zu beurteilen.

Weitere Ausführungen, Hintergrundinformationen und Beispiele zur Anwendung der Methoden finden sich in den entsprechenden Dokumenten des Anhangs zu diesem Leitfaden. Die vorgestellten Hinweise spiegeln die fachtechnische Auffassung des Forschungskonsortiums SOLIT² wider. Die beispielhaft gezeigten Messergebnisse beziehen sich insbesondere auf BBA, die im Rahmen des Forschungsvorhabens getestet wurden, sowie auf BBA, die im Rahmen anderer Forschungsvorhaben, wie z. B. SOLIT, SAFE[1] und UPTUN, getestet wurden. Außerdem beziehen sich die im vorliegenden Leitfaden geschilderten Ergebnisse auf Erkenntnisse aus öffentlich zugänglichen Versuchsergebnissen, Quellen und Erfahrungen Dritter sowie auf Erfahrungen und eigenen Überlegungen der einzelnen Mitglieder des Forschungskonsortiums.

Der Leitfaden befasst sich schwerpunktmäßig mit Wassernebel- und Sprühflutanlagen (wasserbasierte BBA). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens können deshalb nicht ohne weiteres auf andere Systemarten und -typen übertragen werden. Soweit dem Konsortium Informationen und Erkenntnisse vorlagen, werden auch Hinweise zu anderen Anlagentypen gemacht, so z. B. zu Schaum-BBA. Aussagen zu Druckluftschaum-BBA werden hingegen im vorliegenden Leitfaden nicht getätigt, weil hierzu den Mitgliedern des Forschungskonsortiums keine ausreichenden Informationen vorlagen. Wenn im vorliegenden Leitfaden von Schaum-BBA die Rede ist, dann handelt es sich um solche Schaum-BBA, in denen kein Druckluftschaum verwendet wird.

Die in diesem Leitfaden gezeigten Messergebnisse dienen ausschließlich der Veranschaulichung der hier vorgestellten Methodik.

1.3 Begriffserklärungen

AFFF	Aqueous film forming foam (Filmbildendes Schaummittel)
BBA	Brandbekämpfungsanlage
Bemessungsbrand	Brandgröße zur Dimensionierung von Brandschutzeinrichtungen. Dabei handelt es sich nicht um die maximal auftretende Brandgröße.
CFD	Computual Fluid Dynamics

[1] Projekt der Eurotunnel S. A.

HDWN	Hochdruckwassernebel
HRR	Heat Release Rate (Energiefreisetzungsrate) von Bränden
MADM	Minimum Absolute Deviations Methode
NFPA	National Fire Protection Association
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RAMS	Reliability, Availability, Maintainabilty und Safety
Sicherheit	Sicherheit von Tunnelnutzern, Einsatzkräften und der Infrastruktur
spezifisches Sicherheitsniveau	Das Sicherheitsniveau das durch das Erfüllen von bestimmten Schutzzielen erreicht wird
VDS	VdS Schadenverhütung GmbH
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

1.4 Weitere Normen und Regelwerke

- NFPA 502: “Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways”, Ausgabe: 2011
- NFPA 750: “Standard on Water Mist Fire Protection Systems”, Ausgabe: 2010
- NFPA 20: “Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection”, Ausgabe: 2010
- NFPA 13, Installation of Sprinkler Systems; Ausgabe 2010
- RABT: „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“, Aktuelle Ausgabe: 2006
- PIARC – FFFS: „Road tunnels: an assessment of fixed firefighting systems”, Ausgabe: 2008
- UPTUN „Guideline for Water Based Fire Fighting Systems for the Protection of Tunnels and Sub Surface Facilities “ WP251, Ausgabe 2007
- ZTV-ING: „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“, Ausgabe: 2010
- 2004/54/EG: Richtlinie des europäischen Parlaments über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, Ausgabe 2004
- Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Heft B66, BASt
- Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5), BASt
- EN 54-4, Branderkennungs- und Alarmsysteme
- EN 12259-1, Komponenten für Sprinkler und Sprühwasserlöschanlagen.
- EN 12845, Sprinkleranlagen – Planung, Einbau und Wartung
- EN ISO 14847, Rotary positive displacement pumps – Technical requirements (ISO 14847:1999).
- VdS 2108: Richtlinien für Schaumlöschanlagen: Planung und Einbau. Ausgabe 2005-05
- VdS 2109, Sprühwasser Löschanlagen. Planung und Einbau. Ausgabe 2012-06.
- European Agreement concerning the international carriage of dangerous goods by road (ADR)
- Bundesfernstraßengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 28. Juni 2007 (BGBl. I S. 1206), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist.

1.5 Quellen

Die in dem Bericht angeführten Quellen können im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten beim Projektkoordinator unter *contact@SOLIT.info* angefordert werden, sofern diese öffentlich zugänglich sind und nicht einer Vertraulichkeit unterliegen.

Teil 2 Grundlagen

2.1 Anwendungsbereich

Dieser Leitfaden ist primär anwendbar für die Bewertung von Sicherheitseinrichtungen in Straßentunneln oder ähnlichen Bauwerken. Die Bewertung basiert auf einem risikobasierten Ansatz und hängt nicht von der Länge oder der Ausgestaltung des Tunnels ab. Vielmehr ist das im jeweiligen Einzelfall vorhandene Risiko zu ermitteln und zu bewerten. Das Risiko der einzelnen Bauwerke wird durch die Häufigkeit von möglichen Schadensereignissen, z. B. durch das Eintreten eines Brandes bei geringer oder hoher Verkehrsdichte von LKW, sowie der Schadensauswirkungen bestimmt.

Die Methoden und Mindestanforderungen dieses Leitfadens können auch auf andere Arten von Bauwerken mit einem ähnlichen Risiko- und Gefährdungspotenzial bzw. -profil übertragen werden. Bei jeder einzelnen hier aufgezeigten Methode ist jeweils zu prüfen, ob diese für die Anwendung auf die spezifische Größe, Geometrie, Nutzung und Ausgestaltung des Tunnels oder sonstigen Bauwerkes geeignet ist. Dies ist insbesondere bei der Wahl der Eingangsdaten in Berechnungs- und Simulationsmodellen zu beachten.

Die Ausgangsbasis für die Auswahl der Schutzziele- und damit der Ausgangsparameter für die Ermittlung und Bewertung von Kompensationsmöglichkeiten obliegt dem Planer bzw. der für die Genehmigung zuständigen Stelle. Die Schutzzieldefinition sollte jedoch gemäß den anerkannten Regeln der Technik und in Anlehnung an die europäische Verordnung 2004/54/EG (Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz) erfolgen.

Ausgehend von den Methoden des Leitfadens ist es möglich, hiervon abweichende individuelle Schutzziele, z. B. basierend auf anderen Regelwerken, zu verwenden. Dies ist für die Nachweisführung in geeigneter Form zu dokumentieren.

2.2 Schutzziele und Stand der Technik

Die Ausrüstung von Tunneln sowie die Gefahrenabwehrmaßnahmen sind international häufig unterschiedlich geregelt. Die Schutzziele sind aber in der Regel gleichartig und können wie folgt zusammengefasst werden [LAK 2012]:

- Personenschutz,
- Bauwerksschutz,
- Unterstützung/Ermöglichen der Fremdrettung,
- und Brandbekämpfung

Je nach Land werden Mindestanforderungen und Maßnahmen zum Erreichen dieser Schutzziele in unterschiedlichen Richtlinien oder Regelwerken beschrieben.

In Deutschland fällt der Personen- und Bauwerksschutz in den Zuständigkeitsbereich des Baulastträgers[2] des jeweiligen Bauwerks (z. B. Bund, Bundesland und Kommune) und wird im Regelfall durch die ZTV-ING sowie die RABT abgedeckt.

Die Gefahrenabwehr[3] fällt in Deutschland in den Zuständigkeitsbereich der Länder und wird damit durch die Feuerwehr- und Hilfeleistungsgesetze und Verordnungen der einzelnen Bundesländer geregelt.

Durch diese Aufgabenteilung ist eine enge Koordination und Zusammenarbeit bereits in der Planungsphase eines Tunnelsicherheitssystems notwendig, damit alle Maßnahmen sinnvoll miteinander kombiniert und aufeinander abgestimmt werden.

Da international immer mehr Tunnel von privaten Firmen, z. B. mautfinanziert im Rahmen von öffentlich-privaten Partnerschaften (ÖPP), betrieben werden und sich darüber hinaus eine volkswirtschaftliche Betrachtungsweise der Bedeutung von Verkehrsinfrastruktur zunehmend durchsetzt, gewinnen neben den oben genannten allgemeinen Schutzziele die folgenden spezifischen Ziele in der Praxis eine immer größere Bedeutung, auch wenn diese bisher noch kaum Eingang in die entsprechenden Normen gefunden haben:

- Reduzierung der Schäden am Bauwerk
- Reduzierung der Kosten im Ereignisfall
- Erhalt einer hohen Verfügbarkeit
- Reduzierung der volkswirtschaftlichen Kosten

Die Schutzziele und die derzeit zur Anwendung kommenden Maßnahmen werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.2.1 Personenschutz

Nutzer von Tunnelanlagen müssen im Ereignisfall (Brand) unmittelbar nach dem Eintritt des Ereignisses über einen gewissen Zeitraum die Möglichkeit haben, den Tunnel sicher und eigenständig zu verlassen oder in sichere Bereiche zu gelangen (Selbstrettung). Aufgrund der besonderen Bedingungen bei einem Tunnel (Anfahrt, Vorrücken im Tunnel) kann dabei nicht davon ausgegangen

[2] Der Baulastträger im Straßenbau ist in der Bundesrepublik Deutschland die Institution, die für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Unterhaltung einer Straße zuständig ist, die für den öffentlichen Verkehr bestimmt ist. In der Regel ist dies die öffentliche Hand (Staat, Gemeinde).

[3] Darunter versteht man in der Regel die Fremdrettung sowie die Brandbekämpfung und andere Gefahrenabwehrmaßnahmen durch die Feuerwehr.

werden, dass Fremdrettungskräfte, wie z. B. die Feuerwehr, zeitnah unterstützend tätig werden können.

In Deutschland sieht das Konzept der RABT vor, dass mit Erreichen eines sicheren Bereiches die Selbstrettung erfolgreich ist. Als sichere Bereiche gelten unter anderem Notausgänge und Portale. Zur Unterstützung der Selbstrettung werden verschiedene Maßnahmen, wie z. B. der Bau von Notausgängen und Rettungsstollen, die Installation von Fluchtwegsmarkierungen, Durchsagen über Lautsprecher und Radiofrequenzen im Ereignisfall, vorgesehen.

Längere Tunnel werden mit Brandfalllüftungen ausgestattet, um für den Zeitraum der Selbstrettung eine überlebensfähige Atmosphäre sicherzustellen. Bei der Verwendung von Längslüftungssystemen in Richtungsverkehrstunneln wird dabei der entstehende Brandrauch in die Richtung des abfließenden Verkehrs gedrückt, um den Bereich, in dem sich möglicherweise Fahrzeuge zurück gestaut haben und Personen aufhalten, rauchfrei zu halten.

Bei der Verwendung von Halbquer- oder Querlüftungsanlagen in sehr langen Richtungsverkehrstunneln[4] oder längeren Gegenverkehrs- bzw. Richtungsverkehrstunneln[5] mit täglichem Stau soll hingegen versucht werden, durch eine Absaugung der Rauchgase, die Rauchausbreitung örtlich zu begrenzen und eine raucharme Schicht in Bodennähe zu erhalten. Die erwünschte Rauchschichtung stellt sich in Abhängigkeit von der Brandgröße und damit der Rauchmenge, dem lichten Tunnelquerschnitt sowie der Längsströmung unter planmäßigen Bedingungen ein. Die vorhandene Längsströmung muss dabei kontrolliert werden, damit sich eine Schichtung des Rauches ausbilden kann. Durch Turbulenzen, z. B. verursacht durch Fahrzeuge im Tunnel, kann diese Schichtung gestört werden.

Bei der Beurteilung der Wirkung von Brandfalllüftungen ist zu beachten, dass erhebliche Zeit zwischen der Erkennung und Lokalisierung des Brandes bis zur Erreichung der vollen Leistungsfähigkeit der Anlage verstreichen kann. Insbesondere bei sich schnell entwickelnden Bränden (wie z. B. Flüssigkeitsbränden) mit starker Rauchentwicklung sowie bei großen Längsneigungen des Tunnels ist dies problematisch.

[4] Gemäß RABT ab 3.000 m

[5] Gemäß RABT ab 1.200 m, je nach örtlicher Situation bereits ab 600 m

2.2.2 Schutz des Bauwerkes

2.2.2.1 Grundsätzliches

In Deutschland ist die Konstruktion von Tunneln hinsichtlich des baulichen Brandschutzes durch die ZTV-ING geregelt. Regelwerke und Anforderungen aus anderen Ländern können in der Methodik des Leitfadens analog angewendet werden.

Grundsätzlich wird nach ZTV-ING gefordert, einen Tunnel so zu planen, dass „bei einer Brandeinwirkung

- keine Schäden auftreten, die die Standsicherheit des Tunnels gefährden,
- keine bleibenden Verformungen der Konstruktion entstehen, die die Gebrauchstauglichkeit des Tunnels einschränken und
- die Dichtigkeit weitgehend gewährleistet ist.“

Die ZTV-ING definiert für die brandschutztechnische Bemessung von Straßentunneln eine Brandbelastung nach einem vorgegebenen Temperatur-Zeit-Verlauf. Sie gibt vor, dass die tragende Bewehrung im Brandfall nicht über 300°C erwärmt wird. Dies kann in der Regel durch Einhaltung einer ausreichenden Betondeckung sichergestellt werden. Für Tunnelinnenschalen von Gewölbequerschnitten wird hierfür ein Nennmaß von 6 cm genannt.

Es sei jedoch an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass die Schutzwirkung der Betondeckung entscheidend von der Dauer der Brandeinwirkung, deren Intensität und der Ausgestaltung der Betonüberdeckung beeinflusst wird.

Die Festlegung von baulichen Brandschutzmaßnahmen erfolgt unter Beachtung der örtlichen Randbedingungen, der Wirtschaftlichkeit und projektspezifischer Schutzziele. In der Regel sind die konstruktiven Maßnahmen der ZTV-ING für den baulichen Brandschutz ausreichend. Ist dies nicht der Fall, können unter bestimmten Bedingungen zusätzliche konstruktive Schutzmaßnahmen zur Anwendung kommen.

2.2.2.2 Baulicher Brandschutz von Tunneln

Nach den Forderungen der ZTV-ING (s. o.) dient der bauliche Brandschutz von Tunneln vordringlich dem Erhalt der Standsicherheit des Bauwerkes. Darüber hinaus soll aber auch Personenschäden, die z. B. durch Abplatzen von Betonteilen entstehen können, vermieden werden. Dies kann beispielsweise durch sogenannte passive Brandschutzmaßnahmen erfolgen, die allerdings die direkten Auswirkungen eines Brandes auf die Tunnelnutzer, Fremdrettungskräfte und Fahrzeuge im Tunnel nicht reduzieren.

In Abhängigkeit von den jeweiligen spezifischen Anforderungen kommen heute zumeist die folgen-

den baulichen Brandschutzmaßnahmen zur Anwendung:

Normalbeton ohne ergänzenden Brandschutz

Die Innenschale des Tunnels wird nur für einen normalen Brand gemäß ZTV-ING dimensioniert. Dies ist akzeptabel, wenn Brandtemperatur und Branddauer als vergleichsweise gering erwartet werden, wenn die Wahrscheinlichkeit eines Brandereignisses niedrig ist und das zu erwartende Schadensausmaß[6] durch die Brandbelastung akzeptabel ist.

Ein Normalbeton kann mit einer höheren Betonüberdeckung der tragenden Bewehrung gegen zu große Betonabplatzungen und damit gegen den Verlust der Tragfähigkeit im Brandfall geschützt werden. Die nach ZTV-ING für die offene Bauweise in der Decke vorgeschriebene Zusatzbewehrung zum Schutz gegen Abplatzungen[7] ist bei geschlossener Bauweise nur bei Zwischendecken vorgeschrieben.

Es wird keine besondere Betonrezeptur benötigt, sodass auch Ausbesserungsarbeiten nach einem Brand mit Normalbeton durchgeführt werden können. Jedoch ist die Schutzwirkung für die Bewehrung begrenzt und es ist ein entsprechend der zusätzlichen Betondeckung größeres Ausbruchsprofil notwendig.

Spezieller Brandschutzbeton

Insbesondere durch die Zugabe von Polypropylenfasern (PP-Fasern) in den Beton, die Verwendung spezieller Zuschlagstoffe (Basalt) und die Begrenzung des Größtkörns konnten in Ofenbrandversuchen an Betonprobekörpern im Vergleich zu einem Normalbeton deutlich geringere Abplatztiefen und signifikant kleinere Abplatzflächen nachgewiesen werden. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass im Brandfall die Polypropylenfasern auf der dem Brand zugewandten Seite schmelzen und so durch den zusätzlichen Porenraum den Druck durch das verdampfende Wasser im Beton verringern. Der Basaltzuschlag wird bei der Hitzebeanspruchung nicht zersprengt, sondern versintert [HAA 2008].

Durch diese Maßnahme werden eine deutliche Reduzierung der Betonabplatzungen und damit eine Verringerung der Schäden im Brandfall bei gleicher Betondeckung erreicht. Gleichzeitig entsteht, anders als z. B. bei der Verwendung von Brandschutzbekleidungen, keine Behinderung bei der regelmäßigen Sichtinspektion der Tragkonstruktion.

Nach einem Brand ist die Schutzwirkung des Betons gegen zukünftige Brände nicht mehr vorhanden und es muss eine Erneuerung des beschädigten Betons erfolgen.

Die mit dem „Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 13/2012“ vom 21.09.2012 eingeführte Aktualisierung der ZTV-ING sieht vor, dass für einen erhöhten baulichen Brandschutz bei neuen Straßentunneln eine Ausführung der Innenschale mit Polypropylen-Faserbeton (PP-Faserbeton) grundsätzlich vorzusehen ist. Bei Verwendung von PP-Faserbeton darf auf eine verzinkte Mattenbewehrung (N94) in Zwischendecken verzichtet werden.

Brandschutzbekleidung (Brandschutzplatten oder Brandschutzputz)

Für den Schutz des Konstruktionsbetons von Tunneln vor Brandeinwirkungen können auch Brandschutzplatten oder Brandschutzputze eingesetzt werden. Beide Varianten können auch nachträglich in den Tunnel eingebracht werden und ggf. abschnittsweise ausgetauscht werden, sofern der Querschnitt dies erlaubt. Für die Installation sind in der Regel umfangreiche Bohr- und Dübelarbeiten notwendig, die die Statik der Konstruktion des Bauwerkes nicht beeinträchtigen dürfen.

Weiterhin ist zu beachten, dass Sichtinspektionen[8] des Bauwerkes und damit z. B. das Erkennen von Rissen oder Undichtigkeiten nicht mehr möglich sind. Bei Undichtigkeiten besteht die Gefahr, dass Platten- und Putzsysteme Wasser aufnehmen und dadurch ein höheres Eigengewicht und eine verminderte Wärmedämmeigenschaft erhalten. Nach einem Brand müssen Elemente ausgetauscht (bei Platten) bzw. Flächen (bei Putzen) wiederhergestellt werden, welche einer höheren Temperatur ausgesetzt wurden. Die darunter liegende, tragende Betonkonstruktion, wird meist nicht beschädigt, so dass eine Sanierung nach einem Brand nicht erforderlich wird.

[6] Bisher wird hier nur der Schaden am Bauwerk, jedoch nicht der volkswirtschaftliche Schaden durch die Nichtverfügbarkeit des Tunnels betrachtet.

[7] Durch die Mattenbewehrung soll die Betondeckung mechanisch fixiert und vor Herabfallen geschützt werden, auch wenn von einer Zerstörung der Betonstruktur ausgegangen wird.

[8] DIN 1076 schreibt vor, dass im Rahmen einer Hauptprüfung alle Teile des Bauwerkes, auch die schwer zugänglichen Stellen, eingehend geprüft werden. Abdeckungen und Verkleidungen müssen dazu entfernt werden.

Dadurch, dass durch die Bekleidung des Betons dieser weniger Wärme aufnehmen kann, verbleibt im Fall eines Brandes mehr Energie im Tunnel, die anderweitig, z. B. durch eine leistungsfähigere Brandfalllüftung, abgeführt werden muss.

2.2.3 Unterstützung der Fremdrettung und Brandbekämpfung

An Rettungskräfte werden beim Einsatz zur Fremdrettung und zur Durchführung von Brandbekämpfungsmaßnahmen in Tunneln besonders hohe Anforderungen gestellt. Die Einsatzkräfte müssen teilweise unter extremen Bedingungen arbeiten. Deshalb sind alle Sicherheitsmaßnahmen bereits in der Planungsphase mit den Rettungsdiensten abzustimmen.

Die Zeit zwischen der Alarmierung der Einsatzkräfte und dem Beginn der Maßnahmen am Unglücksort ist insbesondere bei Ereignissen in längeren Tunneln oft relativ lang. Daher sind die Möglichkeiten zur Fremdrettung von Personen aus dem unmittelbaren Gefahrenbereich begrenzt. Deshalb steht die Selbstrettung immer an erster Stelle (siehe hierzu Abschnitt 2.2.1).

Die Brandfalllüftung wird zur Unterstützung der Feuerwehr so betrieben, dass ein einseitiger Rauchabtrieb erfolgen soll. Dies ist aber nur bis zur jeweiligen Bemessungsbrandgröße gewährleistet. Überschreitet das Brandereignis den Bemessungsbrand, so ist eine geregelte Entrauchung bzw. Rauchführung nicht oder nur eingeschränkt möglich. Mit steigender Brandgröße behindert nicht nur der Rauch sondern auch die zum Teil erhebliche Wärmestrahlung das Vorrücken der Feuerwehr.

Zur Beschleunigung der Brandbekämpfungsmaßnahmen sind Tunnel ab einer Länge von 400 m mit vorgefüllten (sog. nassen) Löschwasserleitungen ausgestattet. Aber auch hier ist es notwendig, dass die Einsatzkräfte nahe genug an den Brandherd gelangen können, um sichere und schnelle Brandbekämpfungsmaßnahmen durchführen zu können. Dies kann teilweise auch über die Notausgänge realisiert werden.

Als weitere Maßnahmen sind Feuerwehrbedienfelder im Portalbereich vorgesehen. Auch eine möglicherweise vorhandene Videoüberwachung kann zur Lageermittlung genutzt werden, solange eine ausreichende Sicht gegeben ist. Für die besonderen Bedingungen in Tunneln sind spezielle Ausrüstungen und Fahrzeuge vorzuhalten.

Einsatzkräfte sind speziell für den Einsatz in Tunneln zu schulen. Nach der RABT sind regelmäßige Übungen durchzuführen und zu dokumentieren, wobei die besonderen technischen und örtlichen Gegebenheiten im jeweiligen Tunnel zu berücksichtigen sind. Ab einer gewissen Brandgröße[9] kann jedoch von einer Zugänglichkeit der Brandstelle für Einsatzkräfte dennoch nicht sicher ausgegangen werden. Brandbekämpfungsmaßnahmen und Rettungsarbeiten können erst dann begonnen werden, wenn die Brandlast entsprechend weit abgebrannt ist.

2.2.4 Reduzierung volkswirtschaftlicher Kosten und Erhöhung der Verfügbarkeit

In der Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments wird unter den Gründen für die Erstellung der Richtlinie ausgeführt: „ … Tunnelunglücke der jüngeren Vergangenheit unterstreichen die Bedeutung, die Tunnel für die Menschen sowie in wirtschaftlicher und kultureller Hinsicht besitzen….“ Obwohl die Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Kosten in vielen Ländern noch nicht in Regelwerke (für Tunnel) gefasst wurde, gewinnen diese Kosten bei der Bewertung der Auswirkungen von Tunnelbränden zunehmend an Bedeutung. Dies ergibt sich zum einen aus der Verantwortlichkeit der oft öffentlichen Bauherren für die sparsame Verwendung von öffentlichen Mitteln, aber auch aus der immer größeren Anzahl von öffentlichen-privaten Partnerschaften (ÖPP).

Tunnel stellen oft wichtige Teile der Infrastruktur dar, deren Ausfall zu erheblichen Belastungen privater und kommerzieller Verkehrsteilnehmer führt. Durch Stau- oder Umfahrungszeiten entstehen hohe Kosten z. B. durch Arbeitszeitausfälle und längere Transportwege. Dies gilt sowohl für lange Tunnel, als auch für kurze Unterführungen an Punkten hohen Verkehrsaufkommens in innerstädtischen Bereichen. Neben den eigentlichen Tunnelnutzern werden aber auch z. B. Anwohner von Umfahrungsstrecken beeinträchtigt, wenn es dort zu deutlichen Verkehrsmehrbelastungen kommt. Dies kann auch erhebliche Auswirkungen auf die dort angesiedelten Wirtschaftsbetriebe haben. in der Richtlinie 2004/54/EG heißt es dazu ebenso: „ … Tunnel von über 500m Länge stellen wichtige bauliche Einrichtungen dar, die großräumige Gebiete in Europa miteinander verbinden und für das Funktionieren und die Entwicklung der regionalen Wirtschaft eine entscheidende Rolle spielen….“

Diese Aspekte spielen dann eine besondere Rolle, wenn nur wenige Verkehrsverbindungen zur Verfügung stehen, wie z. B. bei Flussquerungen oder

[9] Der Wert hängt vom Brand und der Tunnelgeometrie sowie weiteren örtlichen Gegebenheiten ab. Nach Einschätzung des Konsortiums kann ein Wert von ca. 15-20 MW angenommen werden.

wenn Tunnel als Ersatz oder Entlastung anderer Straßen dienen. Die ursprüngliche Infrastruktur ist dann nicht mehr in der Lage, das Verkehrsaufkommen aufzunehmen.

Brandschutzmaßnahmen sind daher so zu wählen, dass diese zum einen die Lebenszykluskosten (LZK) sinnvoll begrenzen und zum anderen die Tunnelnutzer schützen und die Verfügbarkeit des Bauwerkes für die Nutzer möglichst hoch halten.

Bei Mauttunneln sind neben den nur indirekt quantifizierbaren volkswirtschaftlichen Kosten die direkten Ausfälle an Mauteinnahmen zu berücksichtigen. Bei privat finanzierten Projekten werden häufig Strafzahlungen für Zeiträume, in denen der Tunnel nicht oder nur eingeschränkt nutzbar ist, fällig. Grundsätzlich ist eine maximale Verfügbarkeit der Tunnel anzustreben, indem Ausfallzeiten durch Reparaturen minimiert werden.

2.3 Nachrüstung von Tunneln

Die vorgenannten Schutzziele gelten sowohl für neue als auch für bestehende Tunnelbauwerke. Für Neubauten werden stets die jeweils aktuellen Anforderungen bereits in der Planungsphase berücksichtigt. Insbesondere für ältere Bestandsbauwerke ist aber nicht auszuschließen, dass die bei einer u. U. Jahrzehnte zurückliegenden Planung zu Grunde gelegten Sicherheitsanforderungen nicht mehr dem aktuellen Stand entsprechen. Durch neue Anforderungen in Regelwerken, gestiegene Ansprüche an die Sicherheit oder durch ein höheres Risiko kann es notwendig werden, bestehende Tunnel nachzurüsten. Infrastruktur und technische Anlagen müssen dann mit einem erheblichen finanziellen Aufwand angepasst werden.

Beispiele sind die Erhöhung der Feuerwiderstandsklasse der Betonüberdeckung zum Schutz der Bewehrung oder die Verkürzung der Abstände von Notausgängen. Auch bei einer nachträglichen Leistungssteigerung der Brandfalllüftung stellen räumliche Limitierungen erhebliche Probleme dar. Somit sind solche Maßnahmen in vielen Fällen nur mit sehr hohen Kosten zu realisieren.

2.4 Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln

Maßnahmen, die der Sicherheit dienen, können in bauliche und betriebs- bzw. verkehrstechnische Maßnahmen untergliedert werden. Viele sind in den Regelwerken für Tunnel verankert. Stationäre Brandbekämpfungsanlagen (BBA) sind dagegen bisher primär im Hochbau etabliert.

BBA bekämpfen den Brand selber, wohingegen andere Schutzmaßnahmen darauf abzielen, die Auswirkungen eines Brandes zu reduzieren bzw. trotz dieser über einen ausreichenden Zeitraum die im Abschnitt 2.2 genannten Schutzziele zu gewährleisten. BBA sind jedoch nicht darauf ausgerichtet, Brände zu löschen. Vielmehr sollen primär die folgenden physikalischen Effekte erzielt werden, welche in Kapitel 2.4 näher beschreiben werden:

- Begrenzung bzw. Reduzierung der Brandgröße (Wärmefreisetzungsrate),
- Verlangsamung bzw. Verhinderung der Brandausbreitung,
- Reduzierung der Wärmestrahlung,
- Reduzierung des Rauchgasvolumens bzw. Verhinderung des Zurückströmens (Backlayering) der Rauchgase entgegen der vorherrschenden Längsluftströmung.

2.4.1 Anlagentypen

Die hier aufgeführten Erläuterungen sind als pauschale und vereinfachte Beschreibungen im Rahmen einer Einführung zu dieser Thematik zu verstehen. Auf die Darstellung von besonderen Untergruppen von Arten von BBA wurde bewusst verzichtet, um eine exemplarische Darstellung zu ermöglichen. Konkrete Systemtypen und -arten können in der Realität von den hier gemachten Beschreibungen abweichen. Eine Zuordnung und Bewertung von BBA hat daher stets auf Basis konkreter Versuchsdaten und Anlagenparametern zu erfolgen.

Wassernebelanlagen

Wassernebelanlagen bekämpfen Brände mit Wasser in Form von kleinen Tropfen, welche zu 99% einen geringeren Durchmesser als 1000 µm besitzen [CEN 14972]. Die Tropfen werden in speziellen Düsen bei einem Systemdruck von bis zu 140 bar erzeugt. Durch den hohen Druck an der Düse steht ausreichend Energie zur Verfügung, um das Wasser in feine Tröpfchen zu zerteilen und die Tropfen zu beschleunigen. Somit kann die Thermik des Feuers (Plume) überwunden werden, um so zum Brandherd gelangen zu können.[10] Dabei wird die Ventilation des Tunnels genutzt, um eine bessere Verteilung der feinen Wassertropfen über den gesamten Tunnelquerschnitt zu erreichen. So werden auch Bereiche unter der Tunneldecke erreicht und Ansammlungen von Pyrolysegasen oder Antriebsgasen[11] gekühlt und verdünnt [LAK 2012].

[10] Die Geschwindigkeit errechnet sich nach $V_{mean} = Q / A = Q / (\pi * r_{orifice}^{2})$, siehe auch [IFP2006] Magazin, Seiten 45 ff und NFPA [FIR 2003], Chapter 17 „Spray Characteristics“.

[11] Bei Leckagen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebstechnologien können sich brennbare Gase im Deckenbereich ansammeln.

Abb. 1:
Aktivierung einer Wassernebel-BBA in einem Tunnel der M30 in Madrid (Quelle: IFAB)

Die kleinen Wassertropfen haben im Verhältnis zur Wassermenge eine sehr große (Reaktions-) Oberfläche. Dadurch können diese sehr viel Wärme absorbieren und in kürzester Zeit verdampfen. Durch die Kühlwirkung der nachfolgenden Tropfen kondensiert der Wasserdampf unmittelbar außerhalb des Brandherdes. Aufgrund der größeren Reaktionsoberfläche als bei den größeren Tropfen von Sprühflutanlagen, kann die Verdampfungsenthalpie (für Wasser 2267 kJ/kg) im Bereich des Brandherdes nahezu komplett zur Absorption der Energie des Brandes genutzt werden. Dadurch kann die Kühlwirkung erhöht und gleichzeitig die benötigte Wassermenge im Vergleich zu Sprühflutanlagen reduziert werden.

Neben der Kühlung der Rauchgase und der Umgebungsluft werden durch die Nebeltropfen große Teile der Wärmestrahlung absorbiert. Dadurch kann die Temperaturbelastung von Menschen und Materialien im Tunnel deutlich verringert sowie eine Brandausbreitung reduziert werden.

Durch die Benetzung der Brandlast mit Wasser wird diese direkt gekühlt, womit einer Entzündung entgegen gewirkt und deren Abbrand verlangsamt wird.

Nach dem „Fire Protection Handbook“ der NFPA kann Wassernebel zur Bekämpfung von Feststoff- (Klasse A) und Flüssigkeitsbränden (Klasse B) eingesetzt werden[12] [FIR 2003]. Zu einem Verteilen der brennbaren Flüssigkeit durch Lachenbildung kommt es nicht [HÄQ2009].

Zwar breitet sich der Nebel nahezu gasartig aus, Bereiche unter größeren Überdeckungen (z. B. unter einem havarierten Lkw, im Laderaum oder in einem Pkw) werden aber nicht direkt erreicht. Allerdings werden auch in diesen Fällen die Auswirkungen des Brandes effektiv bekämpft[13].

Maßnahmen zum Schutz von Menschen vor dem Löschmedium Wasser sind nicht erforderlich. Dem Löschwasser werden üblicherweise keine Zusätze beigefügt[14]. Eine Aktivierung des Systems kann aus diesem Grunde sofort nach dem Erkennen und Lokalisieren eines Brandes erfolgen.

Im Brandfall werden die Anlagenteile der BBA selbst mit dem durchströmenden Wasser gekühlt und vor Beschädigungen geschützt.

Wassernebelsysteme zeichnen sich in der Regel durch einen einfachen Aufbau aus, woraus sich eine hohe Verfügbarkeit und gute Wartbarkeit ergibt[15].

Sprühflutanlagen[16]

Sprühflutanlagen bekämpfen Brände ebenfalls durch das Ausbringen von Wasser in Form von Tropfen. Diese Anlagen arbeiten im Vergleich zu Wassernebelanlagen mit einem deutlich niedrigeren Druck, meist weniger als 10 bar. Die so erzeugten Tropfen sind damit deutlich größer als bei Wassernebelanlagen und besitzen einen geringeren Impuls (geringere Austrittsgeschwindigkeit).

Das Wirkungsprinzip solcher Anlagen besteht im Wesentlichen in der Benetzung der Brandlast mit Wasser. Dadurch wird diese gekühlt, um eine Entzündung zu verhindern oder die Brandausbreitung zu stoppen. Im Bereich des Sprühstrahls wird auch die umgebende Luft infolge der Erwärmung der Wassertropfen gekühlt. Ebenfalls werden durch die Verdampfung eines relativ geringen Teiles des Wassers geringe Mengen an Energie absorbiert. Dieser Effekt ist aber umso geringer, desto größer die eingesetzten Tropfen in Relation zur Wassermenge sind. Die zur Verfügung stehende Reaktionsoberfläche wird relativ zum eingesetzten

[12] Weitere Erläuterungen sind zu finden in [NFPA 750] (S. 37)

[13] In den Versuchsreihen UPTUN, SOLIT und SOLIT2 konnte gezeigt werden, dass auch bei verdeckten Bränden die Rauchgasvolumina, die Gastemperaturen und die Hitzestrahlung deutlich reduziert werden. Siehe hierzu auch Anhang 2 dieses Leitfadens, [SOL 2007], [UPT 2006].

[14] Von den im Rahmen des Forschungsprojektes recherchierten Wassernebel-BBA setzt lediglich eines AFFF als Additiv ein. Siehe auch Anhang 1 dieses Leitfadens.

[15] Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem von Sprühflutanlagen. Siehe hierzu und zur Wartung und Verfügbarkeit einschlägige Normen des VDS oder der NFPA etc. Beispielsweise beträgt die errechnete Verfügbarkeit der Wassernebel-BBA im Eurotunnel 99,982 % [FOG2012].

[16] Für die Zwecke dieses Leitfadens wird der Begriff synonym mit dem Begriff (offener) Sprinkler verwendet, da die Wirkprinzipien im Wesentlichen gleich sind. Bei Sprühflut-BBA liegen die eingesetzten Wassermengen dabei zumeist über denen von Sprinkler-BBA.

Wasservolumen mit steigender Tröpfchengröße immer kleiner.

Eine Kühlung der Rauchgase außerhalb des Wassersprühstrahls erfolgt nicht. Aufgrund dieser im Vergleich mit Wassernebelsystemen geringeren Energieaufnahme benötigen herkömmliche Sprühwasseranlagen je nach Anwendung eine Wassermenge von 6–20 l/m²/min. [NFP 502].

Abb. 2:
Aktivierung einer Sprühflut-BBA im Mount Baker Tunnel (I-90) in Seattle (Quelle: IFAB)

Eine Einschränkung zeigt sich nach den Beobachtungen des Forschungskonsortiums bei der Bekämpfung von Flüssigkeitsbränden. Die den Brand umgebende Atmosphäre wird gekühlt, jedoch wird das Feuer unter Umständen nur in einem geringeren Umfang bekämpft.

Daneben wird für weitere Vor- und Nachteile auf die Ausführungen zu Wassernebelanlagen verwiesen, soweit diese für Sprühflutanlagen zutreffen, was insbesondere auch für die hohe Verfügbarkeit und relativ geringen Wartungskosten gilt.

Schaumanlagen

Unter Schaumanlagen werden in diesem Leitfaden Anlagen verstanden, die mit einem Löschmittel arbeiten, dessen Verschäumungszahl[17] über 4 liegt. Für Wassernebel- und Sprühflutanlagen (wasserbasierte BBA), die zur Verbesserung der Wirksamkeit Filmbildner, z. B. AFFF oder Netzmittel verwenden, gelten die analogen Abschnitte der obigen Anlagenbeschreibungen. Druckluftschaumanlagen werden in diesem Leitfaden sowie in den zugehörigen Anhängen nicht behandelt[18].

Die Wirkung von Schaum zur Brandbekämpfung beruht laut VDS primär auf dem Erstickungseffekt [VDS2108]. Die Brandlast wird mit Schaum abgedeckt, wodurch die Sauerstoffzufuhr unterbunden wird. Dies ist nach den Erfahrungen und Beobachtungen der Konsortiumsmitglieder jedoch nur in Bereichen möglich, die der Schaum durch Sprühen oder Fließen direkt erreichen kann. In verdeckten Bereichen, wie an der Unterseite von LKW oder im Fahrzeuginneren, entwickelt der Schaum keine oder nur eine sehr eingeschränkte Wirkung. Hier sind hinsichtlich der direkten Brandbekämpfung ähnliche Einschränkungen zu beachten, wie bei Wassernebel- und Sprühflut- bzw. Sprinkleranlagen. Eine Kühlung der Brandlast erfolgt beim Schaum durch das im Schaum enthaltene Wasser, wobei das Verhältnis von Wasser zu Luft (Verschäumungszahl) zu beachten ist. Das Bauwerk wird in gleicher Weise in den Bereichen gekühlt, die vom Schaum erreicht werden. Eine Kühlung heißer Gase erfolgt in geringerem Umfang als bei den vorgenannten Typen von BBA, da tendenziell weniger Tropfen im Gas- und Luftraum zu finden sind und somit in Summe eine kleinere Reaktionsoberfläche zur Kühlung zur Verfügung steht, wie sich aus der folgenden Gleichung [19] ergibt:

$$t_{vap} = \frac{D_0^{\,2}}{K}$$

$$K = \frac{(8 \cdot \lambda)}{(c_p \cdot \rho)} \cdot \ln\left[1 + (T - T_S) \cdot \left(\frac{c_p}{h_{vap}}\right)\right]$$

t_{vap} = Verdunstungszeit [s]

K = Verdunstungskonstante

D_0 = Tropfendurchmesser [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit $[kJ \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

ρ = Dichte $[kg \cdot m^{-3}]$

c_p = Wärmekapazität $[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$

h_{vap} = Verdunstungsenthalpie $[kJ \cdot kg^{-1}]$

Sicherheitsdatenblätter zu Schaumadditiven [SCH2007] warnen zumindest teilweise vor einer Personengefährdung beim Ansprühen von Menschen mit Schaum. Dieser Aspekt ist bei einer Bewertung einer BBA und dem Gesamtsicherheits- bzw. Evakuierungs- und Angriffskonzept der Rettungskräfte zu berücksichtigen.

Sofern das Schaumadditiv Tenside enthält, ist evtl. eine Rutschgefahr zu berücksichtigen. Je nach

[17] Verhältnis zwischen dem Volumen des fertigen Schaums und dem Volumen des ursprünglichen Wasser-Schaummittel-Gemisches

[18] Eine erste Bewertung dieser Technik kann aber beispielsweise der [TUN 2008], Seite 52 ff, sowie [SIN 2005] entnommen werden. Siehe auch Fußnote 20.

[19] [GAN 2002]

Aufbau der Schichtdicke des Schaums können Hindernisse und Notausgänge verdeckt werden. Aspekte der barrierefreien Entfluchtung sind zu beachten. Bei stark anhaftendem Schaum ist zu überprüfen, ob mit einem Verdecken von Gefahrenzettel und Warntafeln an Gefahrguttransportern nach ADR oder Fluchtwegkennzeichnungen zu rechnen ist.

Aufgrund der vorgenannten Aspekte kann es erforderlich sein, eine solche Anlage erst dann zu aktivieren, wenn die Rettung Verunfallter abgeschlossen ist. Der Zeitpunkt der Aktivierung (vor oder nach einer Entfluchtung) ist auf die Spezifika der jeweiligen Schaum-BBA abzustimmen. Einsatzkräfte der Rettungsdienste sind ggf. darüber zu informieren, dass Hindernisse und Warntafeln abgedeckt sein können.

Eine Abschirmung der Wärmestrahlung findet tendenziell in einem geringen Maße als bei Wassernebel- und Sprühflut- bzw. Sprinkleranlagen statt, da weniger Tropfen im Gas- und Luftraum zur Absorption von Wärmestrahlung zur Verfügung stehen [YU2011] [FÖR2012].

For the same amount of water in the space,

$N \sim 1/d^3, N = droplet\ number\ density$

$A_w \sim \frac{1}{d}, A_w = total\ droplet\ surface\ area$

The vaporization rate per droplet:

$$m_d = 2\pi d\left(\frac{k}{C_p}\right)_g \ln\left(1 + \frac{Y_{d,surfacve} - Y_\infty}{1 - Y_{d,surface}}\right)$$

The total vaporization rate = $N\dot{m}_d \sim 1/d^2 \Rightarrow$

The smaller the droplet, the greater cooling and inerting

Thermal radiation transmission ~

$e^{-kf_v/d}, f_v = water\ volume\ fraction$

⇒The smaller the droplet, the greater the attenuation

Abb. 3:

Kühlung und Absorption der Strahlung (Quelle: [YU2011]

In [GRE2005] werden die Wartungskosten von Schaumbrandbekämpfungsanlagen als „hoch“ bezeichnet. Dem Konsortium lagen jedoch nur begrenzt Informationen zu Schaum-BBA für den ortsfesten Einsatz in Tunneln vor. Auf eine weitere Behandlung von Schaum-BBA wird daher im Rahmen dieses Leitfadens verzichtet.[20]

Der Einsatz von Schaum-BBA in Tunneln ist bis heute bei internationaler Betrachtung als Ausnahme anzusehen.

2.4.2 Die Wirkung von BBA in Tunneln

Die folgenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf den Einsatz von BBA auf Basis von Wasser.

Die Wirkmechanismen von BBA in Tunneln werden im Folgenden anhand von Ergebnissen aus Brandversuchen im Originalmaßstab 1:1 erläutert und veranschaulicht. Die Darstellungen basieren auf Messdaten aus Brandversuchen des SOLIT²-Projektes sowie weiteren Brandversuchen ebenfalls im Maßstab 1:1, wie z. B. dem Vorgängerprojekt SOLIT oder den Versuchen im Rahmen des SAFE-STATIONS-Projektes für den Eurotunnel. Für die vergleichende Darstellung werden jeweils Messdaten von Versuchen mit Einsatz einer BBA (linke Seite) korrespondierenden Daten ohne den Einfluss einer BBA (rechte Seite) gegenüber gestellt. Für den Fall „ohne BBA“ werden die bekannten Bemessungsbrandkurven oder Echtdaten aus realen Brandversuchen, wie z. B. aus den Versuchen im Runehamar-Tunnel im Jahre 2003 [ING 2011] genutzt.

Eine Bewertung der Wirksamkeit einer BBA, wie auch jeder anderen Schutzmaßnahme für einen Tunnel muss durch einen Vergleich der entsprechenden Kenngrößen im Fall ohne die Verwendung einer BBA bzw. anderer Schutzmaßnahmen erfolgen. Es ist stets die Gesamtwirkung aller Maßnahmen zu berücksichtigen. Eine Betrachtung einzelner Faktoren ist nicht zielführend.

[20] Es konnte im Rahmen der Forschungsarbeiten nur ein Eisenbahntunnel ermittelt werden, in dem eine Schaum-BBA zum Einsatz kommen soll. Bestehende Installationen oder weitere sich in Planung befindliche Projekte sind nicht bekannt. Brandversuche sind ebenfalls nicht bekannt.
Für die hier ebenfalls nicht behandelten Druckluftschaumanlagen konnte eine Prototypeninstallation sowie ein sich in der Planung befindliches Projekt, beide in Thüringen, ermittelt werden. Weitere Projekte, bei denen Druckluftschaumanlagen als Alternative angedacht waren oder vorgesehen sind, konnten nicht identifiziert werden (für weitere Details siehe auch Anhang 1 dieses Leitfadens). Die einzigen Versuche mit Druckluftschaumanlagen unter Realbedingungen, die recherchiert werden konnten, wurden bereits 2005 durchgeführt. Allerdings konnte keine Installation gefunden werden, die mit der damals getesteten BBA identisch ist.

Daten aus Brandversuchen für den Fall mit BBA divergieren signifikant je nach Anlagentyp. Diese Daten sind daher stets anlagenspezifisch (Typ und Hersteller) zu ermitteln. Die im Folgenden gezeigten Echtdaten beziehen sich auf die im Rahmen des SOLIT²-Forschungsprojektes verwendeten Wassernebelanlagen und sind daher rein exemplarisch zu verstehen. Die Systematik kann aber auch für andere Anlagentypen auf der Basis von Versuchen im Maßstab 1:1 dargestellt werden.

2.4.2.1 Temperaturen und Wärmestrahlung

Für die Bewertung von Temperaturen muss sowohl der konvektive Wärmeübertrag als auch die Wärmestrahlung berücksichtigt werden. Gerade im unmittelbaren Brandbereich spielt letztere eine große Rolle.

Weiterhin ist auch die Dauer der Einwirkung für die Beurteilung der Belastung von Bedeutung.

Im Vergleich zu einem Freibrand werden die Temperaturen deutlich reduziert. Insbesondere bei realen Messwerten im unmittelbaren Brandbereich ist zu berücksichtigen, dass immer eine Mischung aus konvektivem Temperaturanteil und Wärmestrahlung aufgezeichnet wird und die gemessene Temperatur dadurch in der Regel höher ist als der tatsächliche konvektive Anteil. Entscheidend für die Einwirkung auf das Bauteil ist die Temperatur des Materials bzw. der Oberfläche.

Bei der exemplarischen Betrachtung von Temperaturen im Abstand von 20 m in Strömungsrichtung wird die Kühlwirkung der BBA besonders deutlich.

Wird keine BBA verwendet, dann ist 20 m hinter dem Brandherd (vgl. Beispiel mit BBA) noch ein Temperaturniveau festzustellen, das um ein Vielfaches höher liegt. Bei den Brandversuchen im Runehamar-Tunnel wurden selbst nach 458 m noch Temperaturen über 100°C gemessen.

Höhe der Temperaturen mit BBA

BBA in Tunneln können die maximal auftretenden Temperaturen senken. Dabei ist das Reduzierungspotenzial maßgeblich vom Ort und vom Anlagentyp abhängig.

Die folgende Grafik zeigt die Temperaturen im unmittelbaren Brandbereich bei einem LKW-Brandszenario.

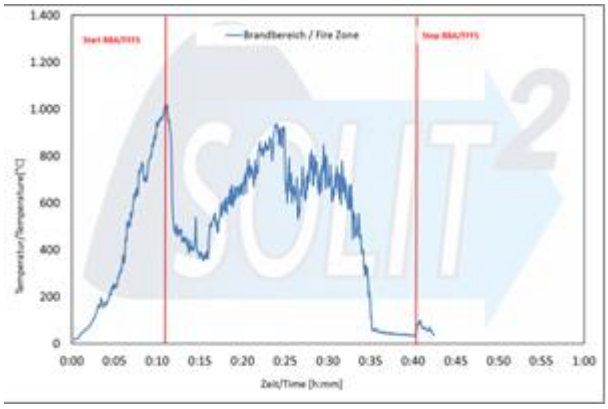


Abb. 4:
Lufttemperaturen unmittelbar über dem Brandherd bei einem Brand einer LKW Brandlast und aktivierter BBA

Abb. 6:
Schematische Darstellung des Bereichs mit hohen Temperaturen bei einem LKW Brand mit aktivierter BBA

Höhe der Temperaturen ohne BBA

Für den Bereich um den Brandherd herum betrachtet, kann eine Bemessungsbrandkurve herangezogen werden. Brandversuche haben gezeigt, dass die ZTV-ING-Kurve oder die RWS- Kurve als realistisch angesehen werden können.

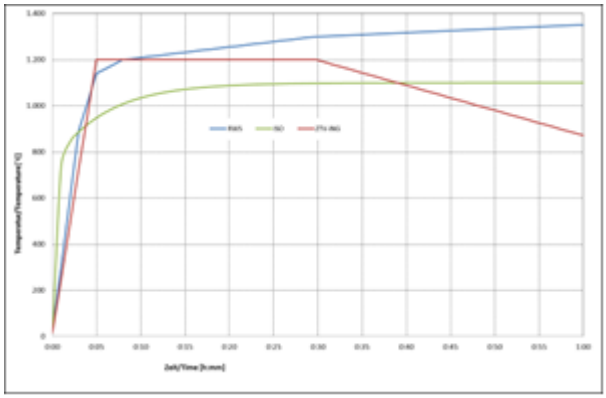


Abb. 5:
RWS, ISO und ZTV-ING Kurve im Vergleich

Abb. 7:
Schematische Darstellung des Bereiches mit sehr hohen Temperaturen bei einem LKW Freibrand

Höhe der Temperaturen mit BBA

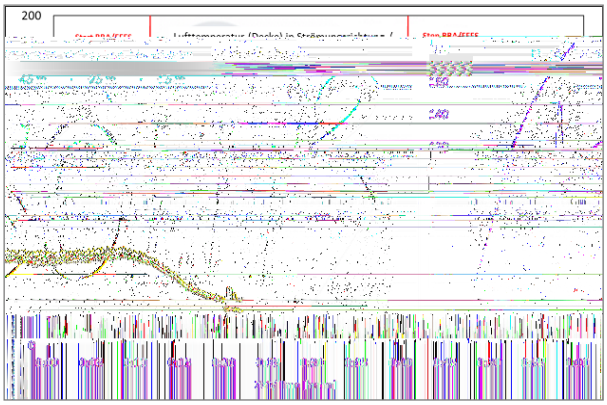


Abb. 8:
Temperaturen über den Tunnelquerschnitt in verschiedenen Entfernungen bei einem Brandversuch mit einer LKW-Brandlast und aktivierter Wassernebel-BBA

Höhe der Temperaturen ohne BBA

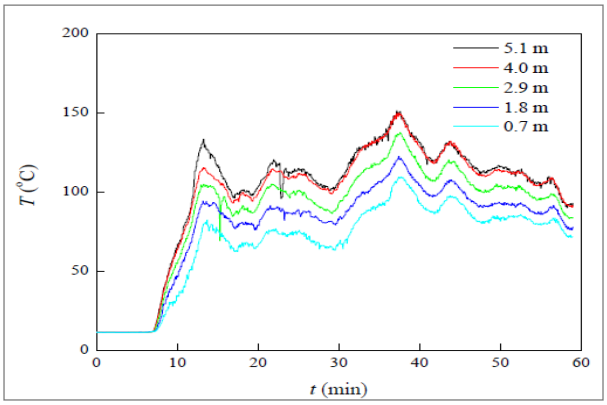


Abb. 9:
Temperaturen über den Tunnelquerschnitt in einer Entfernung von 485 m bei einem Brandversuch mit einer LKW-Brandlast [ING 2011]

Einwirkungsdauer und Einwirkungsbereich hoher Temperaturen mit BBA

Grundsätzlich kann beim Einsatz einer BBA nicht davon ausgegangen werden, dass diese den Brand löscht. Jedoch kann durch die Kapselung des Brandherdes der Bereich der Einwirkung und die dortige Einwirkungsdauer deutlich eingeschränkt werden. Durch die verbesserte Möglichkeit eines frühen Eingreifens der Feuerwehr wird dieser Effekt noch unterstützt.

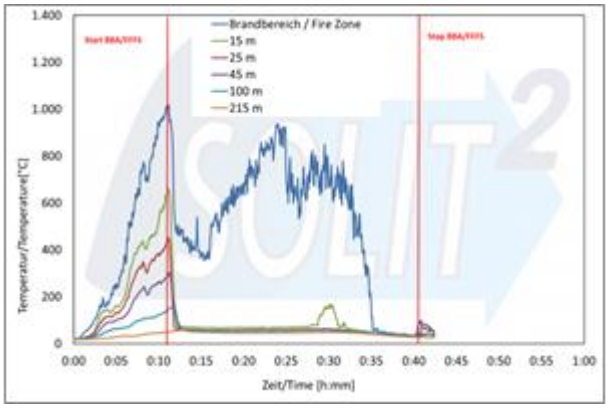


Abb. 10:
Deckentemperaturen in verschiedenen Entfernungen vom Brandherd in Strömungsrichtung bei einem Brandversuch mit einer LKW Brandlast und aktivierter BBA

Einwirkungsdauer und Einwirkungsbereich ohne BBA

Ohne eine BBA kann eine schnelle und unkontrollierte Brandentwicklung stattfinden. Dies spiegelt sich auch in der ZTV-ING und RWS-Kurve wieder. Hinzu kommt eine mögliche Ausbreitung des Brandes auf benachbarte Objekte. Für Tunnel mit einem hohen Risikopotenzial wird derzeit sogar noch eine weitere Verlängerung der rechnerisch anzusetzenden Einwirkungsdauer vorgesehen. Da eine Brandausbreitung nicht eingeschränkt wird und auch die heißen Rauchgase nicht gekühlt werden, ist von einer großflächigen, langen Einwirkung von hohen Temperaturen auf den Tunnel und sich darin befindenden Personen auszugehen.

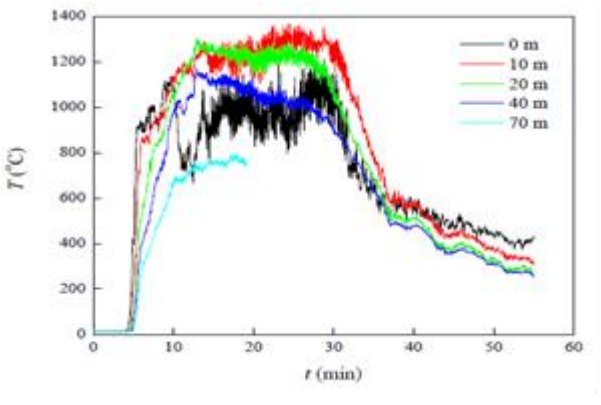


Abb. 11:
Deckentemperaturen in verschiedenen Entfernungen (0-70 m) vom Brandherd in Strömungsrichtung bei einem Brandversuch mit einer LKW Brandlast (Quelle: ING 2011)

Bei Flüssigkeitsbränden ist die Einwirkungsdauer von untergeordneter Bedeutung, da zwar eine schnelle Brandausbreitung stattfinden kann, aber wie in Abschnitt 2.5.4 beschrieben die Dauer des Brandes durch den Brennstoff begrenzt ist. Darüber hinaus wird durch das schnelle Abführen der Flüssigkeit (in Tunneln ist i. d. R. eine seitliche Schlitzrinne angeordnet) die Branddauer erheblich verkürzt. Bei Feststoffbränden werden Brandentwicklung und Brandausbreitung bei Einsatz der BBA deutlich verlangsamt. In den Versuchen mit LKW-Brandlasten wurde stets beobachtet, dass jeweils nur ein Teil der Brandlast brannte. Damit wird die Einwirkungsdauer von hohen Temperaturen auf eine einzelne Stelle signifikant reduziert.

Die Ausbreitung des Brandes auf benachbarte Objekte wird in der Regel verhindert, sodass nur der Initialbrandort betroffen ist. Dies bedeutet, dass eine BBA zwar erhöhte Temperaturen nicht vollständig verhindern kann, aber diese auf eine kürzere Einwirkungsdauer und auf eine kleinere Fläche (i.d.R. der unmittelbare Flammenbereich) begrenzt werden.

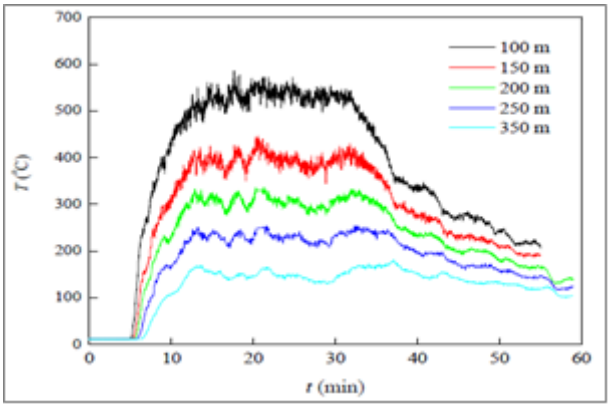


Abb. 12:
Deckentemperaturen in verschiedenen Entfernungen (100-350 m) vom Brandherd in Strömungsrichtung bei einem Brandversuch mit einer LKW Brandlast (Quelle: ING 2011)

Brandbekämpfungsanlagen besitzen insbesondere beim Einsatz kleiner Wassertropfengrößen ein hohes Potenzial zur Absorption von Strahlungswärme und reduzieren damit die Temperatureinwirkung auf entferntere Bauteile.

Höhe der Wärmestrahlung mit BBA

In Abhängigkeit vom Anlagentyp der BBA kann die Einwirkung der Wärmestrahlung z. B. auf die Tunnelinfrastruktur oder Einsatzkräfte deutlich reduziert werden. So konnte in Versuchen gezeigt werden, dass bei aktivierter BBA eine Anäherung auch an sehr große Brandherde bis auf wenige Meter möglich ist[21].

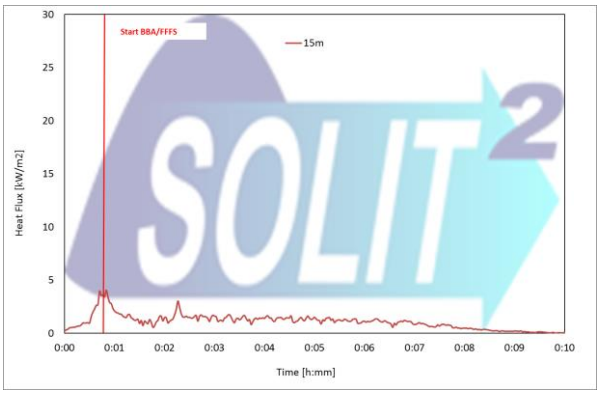


Abb. 13:
Wärmestrahlung bei einem Brandversuch mit einer LKW Brandlast in 15 m downstream Entfernung zum Brand und 1,5 m Höhe

Höhe der Wärmestrahlung ohne BBA

Die Höhe der Wärmestrahlung ohne BBA lässt sich nur schwer abschätzen. Berichte reeller Schadensereignisse dokumentieren aber, dass es durch eine hohe Wärmestrahlung unmöglich war, sich näher als 50 m einem Brandherd zu nähern und dass Feuerübersprünge durch Wärmestrahlung über mehr als 80 m erfolgten [DUF 1999].

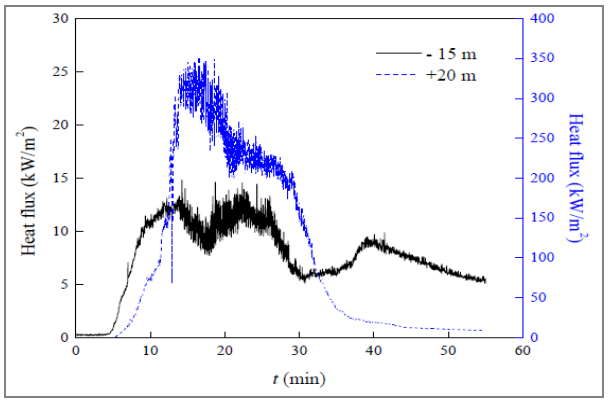


Abb. 14:
Wärmestrahlung bei einem Brandversuch mit einer LKW Brandlast (Quelle: ING 2011)

Dauer der Brandes / Brandausbreitung mit Verwendung einer BBA

Eine BBA ist in der Lage, die Brandentwicklung deutlich zu verlangsamen und eine Ausbreitung des Brandes auf z. B. den nächsten LKW zu unterbinden.

Einsatzkräfte der Feuerwehr können deutlich schneller an den Brandherd gelangen und diesen dann auch einfacher bekämpfen und löschen. Dadurch wird in der Folge eine signifikante Reduzierung der Branddauer erreicht.

Bei Brandversuchen wird die Effizienz von BBA zur Verhinderung der Brandausbreitung zusätzlich mit weiteren Brandobjekten (Zielbrandlasten), die in Strömungsrichtung hinter dem Brandherd platziert werden, überprüft.

Dauer der Brandes bzw. Brandausbreitung ohne Verwendung einer BBA

Ohne den Einsatz einer BBA kann es zu einer schnellen Brandentwicklung und zu einem Übersprung des Brandes auf weitere Objekte kommen.

Bei Bränden in Tunneln wird von einer Ausbreitung von Bränden durch hohe Temperaturen (Rauchgase, nicht Wärmestrahlung) von bis zu 450 m berichtet [DUF 1999].

Auch wenn die Branddauer von 56 Stunden beim Feuer im Mont Blanc Tunnel ein Extrembeispiel darstellt, so ist gegenüber dem Einsatz von BBAs mit einer deutlich längeren Branddauer zu rechnen. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass die Feuerwehr nur unter großen Schwierigkeiten an den Brandherd gelangen kann.

[21] So konnte man sich bei Versuchen mit 60 MW in Vollbrand unter Verwendung von Einsatzkleidung bis auf 1,5m von der Zuluftseite dem Brand nähern

Dauer der Brandes / Brandausbreitung mit Verwendung einer BBA

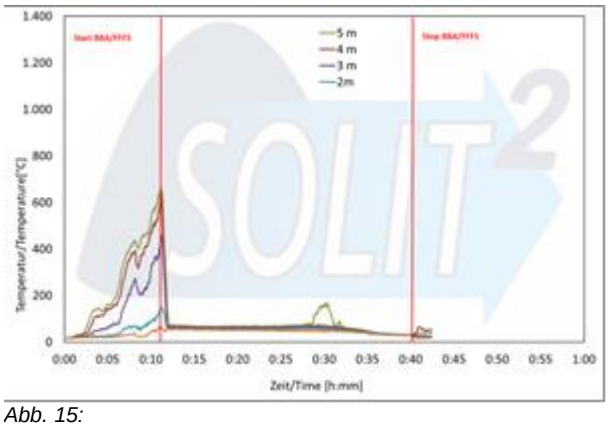


Abb. 15:
Temperatur an einer Zielbrandlast[22] im Abstand von 5 m in Strömungsrichtung zu einem LKW Brand bei aktivierter BBA

Dauer der Brandes bzw. Brandausbreitung ohne Verwendung einer BBA

Abb. 16:
Brandausbreitung auf ein weiteres Objekt im Abstand von 5 m bei einem Brandversuch ohne BBA

2.4.2.2 Dauer des Brandes bzw. Brandausbreitung

In der Regel sind BBA für Tunnel nicht in der Lage, einen Brand vollständig zu löschen. Eine BBA in Tunneln soll die Auswirkungen eines Brandes begrenzen und reduzieren und den Brandverlauf verlangsamen. Das vollständige Löschen des Brandes ist Aufgabe der Feuerwehr. Hierzu ist es von großer Bedeutung, dass ein schneller und sicherer Einsatz ermöglicht wird.

Wärmefreisetzungsrate (HRR)

Die HRR ist eine rechnerische Hilfsgröße um die Auswirkungen eines Freibrandes abzuschätzen. Durch die Angabe einer HRR alleine kann allerdings nicht auf entstehende Rauchgasmengen, Temperaturen und auftretende Gaskonzentrationen geschlossen werden. Dies muss immer im Zusammenhang mit Umgebungsbedingungen, Tunnelquerschnitt, Art der Brandlast(en) und ggf. dem Einsatz einer BBA beurteilt werden.

Bisher wurde oft davon ausgegangen, dass die Wirksamkeit einer BBA durch die Messung der HRR bewertet werden kann. Umfangreiche Auswertungen einer Vielzahl von Brandversuchen zeigen jedoch, dass dies nicht bzw. nur eingeschränkt der Fall ist.

Von der Höhe der HRR kann bei Verwendung einer BBA nicht auf Parameter, wie z. B. Temperaturen, Verhalten der Rauchgase oder andere Effekte im Tunnel geschlossen werden. Daher ist die HRR nicht als primäre Messgröße geeignet, um die Wirksamkeit einer BBA zu bewerten. Vielmehr sind hierzu Parameter, wie die Reduzierung des Rauchgasvolumens, die Absenkung der Temperaturen, die Reduzierung der Strahlungswärme, etc. zu verwenden.

Daneben ist zu berücksichtigen, dass die gängigen Mess- und Rechenverfahren (z. B. nach der Sauerstoffverbrauchsmethode) zur Bestimmung der HRR nur für unbeeinflusste Brände gelten und somit bei Brandversuchen mit BBA eine größere Ungenauigkeit und eine größere Streuung vorhanden sind [STA 2007].

Grundsätzlich wird die Entwicklung der HRR entscheidend von der Zusammensetzung der Brandlast und von den Ventilationsbedingungen beeinflusst. Bei größeren Bränden in Tunneln ist davon auszugehen, dass diese ventilationsgesteuert sind, die Wärmefreisetzung also nicht von der Brandlast sondern von der Sauerstoffzufuhr abhängt. Mit einer höheren Längslüftungsgeschwindigkeit wird der Brand also mit mehr Sauerstoff versorgt und damit steigt auch die HRR.

[22] Mit der Zielbrandlast (engl. Target) wird überprüft, ob ein Brandübersprung stattfindet.

HRR Entwicklung mit BBA (Feststoffbrände)

Die Entwicklung der HRR ist neben der Sauerstoffzufuhr maßgeblich von der Zusammensetzung und Anordnung der Brandlast abhängig. So wird durch eine Abdeckung der Brandlast (z. B. Plane) die Bekämpfung des Brandes verzögert. Wie in Abb. 17 beispielhaft gezeigt, wurde in Versuchen beobachtet, dass mit dem Einsatz der BBA der progressive Anstieg der HRR unterbrochen und ihre Höhe im weiteren Brandverlauf begrenzt wird.

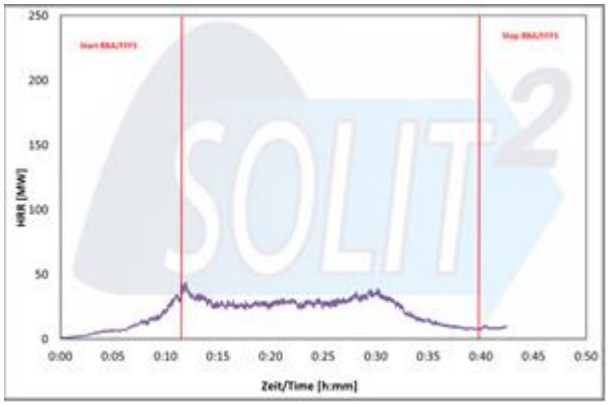


Abb. 17:

HRR bei einem LKW Brand mit abgedeckter Brandlast und aktivierter BBA.

HRR Entwicklung ohne BBA (Feststoffbrände)

Die Entwicklung von Feststoffbränden kann unter Umständen sehr schnell verlaufen. Bei Versuchen im SAFE-STATIONS-Projekt hat sich gezeigt, dass innerhalb weniger Minuten nach Brandentstehung eine HRR bis zu 200 MW erreicht werden können.

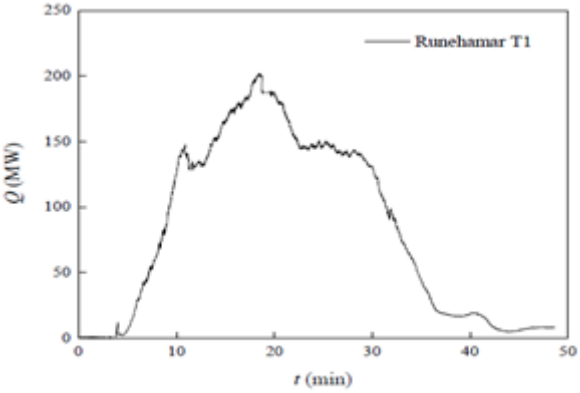


Abb. 18:
HRR bei einem LKW Brand mit abgedeckter Brandlast [ING 2011]

HRR Entwicklung mit BBA (Flüssigkeitsbrände)

Offene Flüssigkeitsbrände können von den meisten BBA sehr gut bekämpft und teilweise sogar gelöscht werden. In der Praxis treten offene Flüssigkeitsbrände jedoch selten auf, da Flüssigkeitslachen auch durch Fahrzeuge verdeckt werden. Daher besteht die primäre Wirkung einer BBA auch hier in der räumlichen Begrenzung und der Reduzierung der Auswirkungen des Brandes.

Gerade weil sich Flüssigkeitsbrände sehr schnell entwickeln und auch auf andere Brandgüter übergreifen können, ist eine schnellstmögliche Aktivierung der BBA angeraten.

HRR Entwicklung ohne BBA (Flüssigkeitsbrände)

Brände von Flüssigkeiten entwickeln sich im Vergleich zu Feststoffbränden deutlich schneller. Allerdings findet auch bei Flüssigkeitsbränden in der Regel keine schlagartige Entzündung der Flüssigkeitsoberfläche statt. Weiterhin ist in der Realität von einer Limitierung der Flüssigkeitsoberfläche auszugehen, da sich durch das Vorhandensein von Schlitzrinnen etc. Flüssigkeiten nur begrenzt ausbreiten können.

Dem Forschungskonsortium sind bisher keine Realbrände in Tunneln bekannt, bei denen sich große Flächen mit brennbaren Flüssigkeiten ausgebildet haben.

2.4.2.3 Rauchentwicklung und -ausbreitung

Bei der Beurteilung der Rauchentwicklung muss grundsätzliche zwischen sichtbarem Rauch, also den Partikeln, und toxischen Gasen unterschieden werden. Die Ausbreitung des Rauches wird maßgeblich durch das Lüftungskonzept beeinflusst. Die Beurteilung von Toxizität und Sichtbarkeit wird im Abschnitt 2.4.3 weiter ausgeführt.

Rauchentwicklung und -ausbreitung mit BBA

Bei einer großen Anzahl von Versuchsbränden konnte durch die Begrenzung der HRR auch die Entstehung von Rauchgasen reduziert werden. Daneben wird durch die Kühlwirkung der BBA das Volumen der Rauchgase verringert. In der Folge kann mit einer vorgegebenen Leistung einer, z. B. bereits installierten Brandfalllüftung die Rauchproduktion eines (theoretisch) deutlich größeren Brandes beherrscht werden, als dies ohne eine Kühlung durch die BBA der Fall wäre. Durch den Impuls des Wassers und die Abkühlung der Rauchgase entsteht eine sehr turbulente Strömung, wodurch eine möglicherweise vorhandene Rauchschichtung zumindest teilweise zerstört wird. Die Konstruktion von Ventilatoren und Rauchkanälen kann den niedrigeren Temperaturen angepasst werden.

Wasserbasierte BBA waschen in einem vernachlässigbar geringen Maße partikelförmige Rauchgasbestandteile aus.

Rauchentwicklung und -ausbreitung ohne BBA

Durch die schnelle Brandentwicklung bei Flüssigkeitsbränden, aber auch bei Feststoffbränden, kommt es bereits unmittelbar nach Brandentstehung zu einer starken Rauchentwicklung. Durch die Turbulenzen im Tunnel, hervorgerufen durch eine Längsströmung und im Tunnel befindliche Fahrzeuge, besteht die Gefahr, dass die Rauchschichtung rasch zerstört wird oder erst gar nicht entsteht.

Daneben ist zu berücksichtigen, dass Lüftungsanlagen meist einige Minuten benötigen, um die volle Leistung zu erreichen. Dies ist insbesondere bei sich schnell entwickelnden Flüssigkeitsbränden von Nachteil.

Abb. 19:
Störung der Rauchschichtung bei aktivierter BBA bei einem vergleichbaren Brand wie Abb. 20

Abb. 20:
Rauchschichtung bei einem 30 MW Flüssigkeitsbrand kurz nach der Zündung auch entgegen der Strömungsrichtung.

2.4.3 Bewertung der Eignung einer BBA für einen spezifischen Tunnel

Für die Bewertung der Eignung einer BBA für einen spezifischen Tunnel sind in einem ersten Schritt die Schutzziele für den jeweiligen Tunnel zu definieren. Diese Schutzziele werden von den verschiedenen Anlagentechnologien und -typen unterschiedlich gut erfüllt. Da die Schutzziele je nach Tunnel von unterschiedlicher Priorität sein können, ist immer eine Prüfung im Einzelfall erforderlich.

Neben der Wirkung der BBA sind deren Wechselwirkungen mit anderen Schutzmaßnahmen, also das Gesamtsicherheitssystem, zu bewerten. Dabei sind für die Beurteilung der Eignung einer BBA die negativen Effekte des Brandes auf die Tunnelnutzer, die Rettungskräfte und das Bauwerk von entscheidender Bedeutung. Es muss dabei nicht nur die Höhe einer Belastung (z. B. Temperaturen, toxische Gase) berücksichtigt werden, sondern auch die Dauer der Exposition.

Im Folgenden wird die Eignung zur Erreichung ausgewählter Schutzziele am Beispiel einer Wassernebelanlage dargestellt. Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, handelt es sich dabei um eine grundsätzliche Systematik, die bei Vorliegen von Versuchsdaten aus Brandversuchen im Realmaßstab für andere Anlagentypen entsprechend anzuwenden ist.

2.4.3.1 Selbstrettung

Die Bedingungen zur Selbstrettung von Personen im Brandfall werden durch verschiedene Belastungsfaktoren bestimmt, die in Ihrer Gesamtheit in einem komplexen Zusammenhang stehen. Die Wirkung dieser Faktoren streut bei unterschiedlichen Personen. Vorrangig zu nennen sind:

- Temperaturen in Atemhöhe
- Konzentrationen toxischer Gase in Atemhöhe
- Sichtweite bzw. Orientierungsfähigkeit

Temperaturen in Atemhöhe

Das folgende Diagramm zeigt die Entwicklung der Temperaturen bei einem LKW-Brand. Dabei zeigt sich deutlich, dass bereits unmittelbar hinter dem Brandort beim Einsatz einer BBA ein überlebensfähiges Temperaturniveau (vgl. Abb. 53) erhalten werden kann. Besonders deutlich zeigt sich dies im Vergleich mit einem Freibrand, bei dem selbst 458 m hinter dem Brandherd noch höhere Temperaturen gemessen wurden, als unmittelbar hinter dem Brandherd bei einer aktivierten Wassernebelanlage.

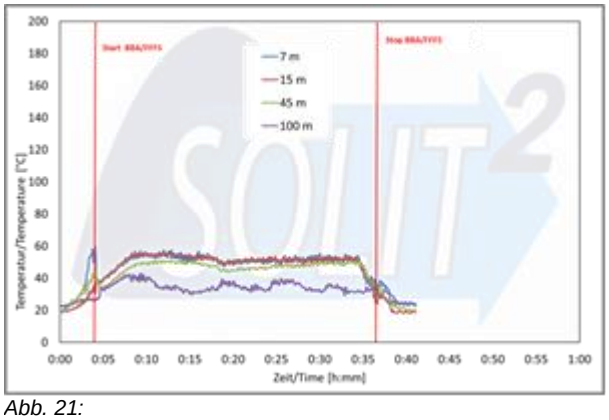


Abb. 21:
Temperaturen in 2 m Höhe in verschiedenen Entfernungen in Strömungsrichtung bei einem LKW Brand mit aktivierter BBA

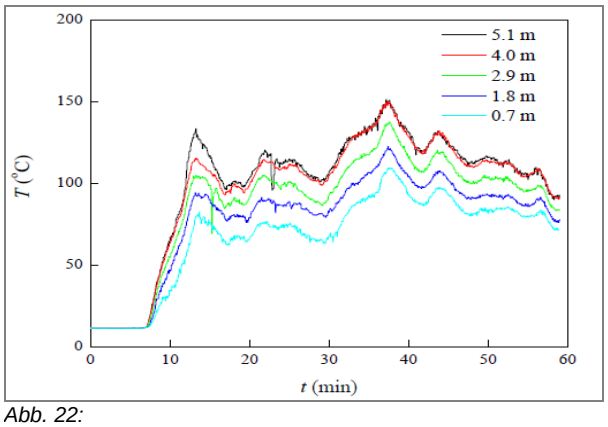


Abb. 22:
Temperaturen in 458 m Entfernung bei einem LKW Brand. Die Temperatur in 1,8 m Höhe kann als Vergleich herangezogen werden. (Quelle: ING 2011)

Bei Versuchen mit Flüssigkeitsbränden zeigen sich ähnliche Ergebnisse. Dies wird im Folgenden am Beispiel eines 50 MW Flüssigkeitsbrandes mit und ohne aktivierte BBA gezeigt:

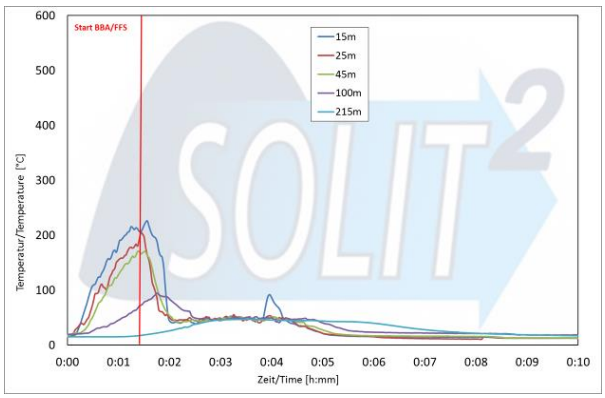


Abb. 23:
Temperaturen in 2 m Höhe in verschiedenen Entfernungen in Strömungsrichtung bei einem Flüssigkeitsbrand mit aktivierter BBA

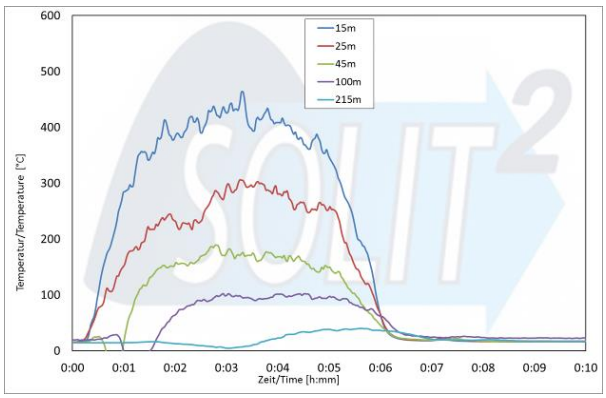


Abb. 24:
Temperaturen in 2 m Höhe in verschiedenen Entfernungen bei einem Flüssigkeitsbrand ohne BBA

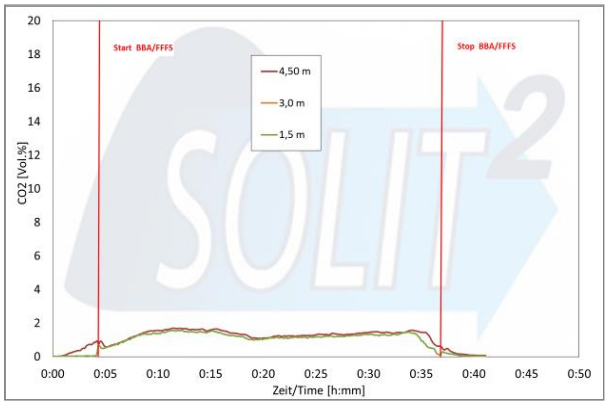


Abb. 25:
CO_2 Konzentrationen bei einem LKW Brand mit aktivierter BBA in einer Entfernung von 45 m

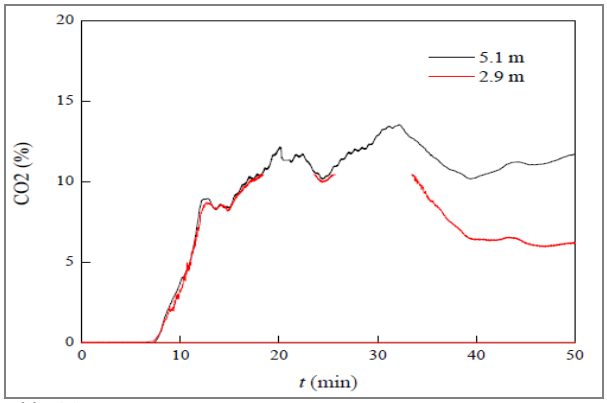


Abb. 26:
CO_2 Konzentrationen bei einem LKW Brand in einer Entfernung von 458 m zum Brandherd (Quelle: ING 2011)

Konzentration toxisch wirkender Gase in Atemhöhe

Die Eignung von Maßnahmen, die auf die Erhaltung einer überlebensfähigen Atmosphäre in Bezug auf die Konzentration toxischer Gase gerichtet sind, muss in Abhängigkeit vom Brandfalllüftungskonzept bewertet werden.

Bei Verwendung einer Längslüftung kann es hinter dem Brandherd (in Strömungsrichtung) grundsätzlich zu einer Verwirbelung der Rauchgase über den Querschnitt kommen, unabhängig davon, ob eine BBA verwendet wird oder nicht.

Bei Anwendung von Lüftungskonzepten, die auf einer möglichen Rauchschichtung basieren, kann es ebenfalls zu einer Verwirbelung über den gesamten Tunnelquerschnitt kommen. Allerdings ist diese schwerpunktmäßig auf den Bereich beschränkt, in dem die BBA aktiviert wird. Bei großen Bränden ist auch hier davon auszugehen, dass eine Verwirbelung des Rauches auch ohne Einsatz einer BBA entsteht, die auch deutlich über den Schadensort hinausreichen kann.

Generell gilt bei einem Vergleich mit Lüftungskonzepten zu berücksichtigen, dass es einige Minuten dauern kann, bis eine Brandfalllüftung die volle Wirksamkeit erreicht.

Durch die Aktivierung einer BBA kommt es zu einer Begrenzung der Wärmefreisetzung und damit normalerweise auch zu einer geringeren Rauchproduktion. Dadurch kann i. d. R. eine überlebensfähige Atmosphäre länger aufrechterhalten werden.

Dies zeigt exemplarisch der Vergleich von Messungen der Kohlendioxid-Konzentrationen (CO_2). Ohne die Verwendung einer BBA wird sehr schnell ein Niveau erreicht, dass in kürzester Zeit für Menschen tödlich ist.

Orientierungsfähigkeit

Die Fähigkeit zur Orientierung im Tunnel spielt eine wichtige Rolle bei der Selbst- und Fremdrettung. Die Orientierungsfähigkeit wird durch die Sicht, aber auch durch Hilfsmittel zur Orientierung (also Fluchtwegskennzeichnung) maßgeblich beeinflusst. Die Orientierungsfähigkeit wird, neben vielen anderen Einflüssen (Alter, Mobilität, Konstitution, Kondition der Flüchtenden, Tageszeit u.v.a.m), maßgeblich durch die Entfluchtungsgeschwindigkeit gekennzeichnet.

Durch das Einbringen des Löschmittels (hier Wassernebel) wird die Sicht beeinträchtigt. Zu den Auswirkungen auf die Rauchgase wird auf Abschnitt 2.4.2.3 verwiesen. Im Rahmen von Brandversuchen in Versuchstunneln und bei Aktivierungen von BBA in echten Tunneln ohne Brände konnte gezeigt [SOL 2007] werden, dass bei einer sinnvoll, z. B. nach RABT im Abstand von 25 m, angeordneten Fluchtwegmarkierung und Beleuchtung, eine ausreichende Orientierung für eine nicht verlangsamte Selbstrettung gegeben ist

2.4.3.2 Fremdrettung und Brandbekämpfungsmaßnahmen

Grundsätzlich gelten für die Fremdrettung ähnliche Kriterien wie für die Selbstrettung. Allerdings verfügen Einsatzkräfte über Schutzausrüstungen und sind entsprechend ausgebildet. Sie können deshalb unter kritischeren Bedingungen handlungsfähig bleiben. Die wesentlichen Kriterien hierfür hier sind:

- Temperaturen und Wärmestrahlung in Atemhöhe
- Orientierungsfähigkeit
- Schutz vor Abplatzungen oder herabfallenden Bauteilen

Die Toxizität der Rauchgase ist für den Einsatz der Rettungskräfte von untergeordneter Bedeutung, da – zeitlich begrenzt – unter Atemschutz gearbeitet wird.

Abb. 27:
Feuerwehrmann unmittelbar neben einem LKW Brand mit aktivierter Wassernebelanlage

Temperaturen und Wärmestrahlung in Atemhöhe

Anders als bei der Selbstrettung, bei der sich die Personen vom Brandherd entfernen, spielen bei der Fremdrettung die Temperaturen im Umfeld des Brandbereiches und die Wärmestrahlung eine sehr viel größere Rolle.

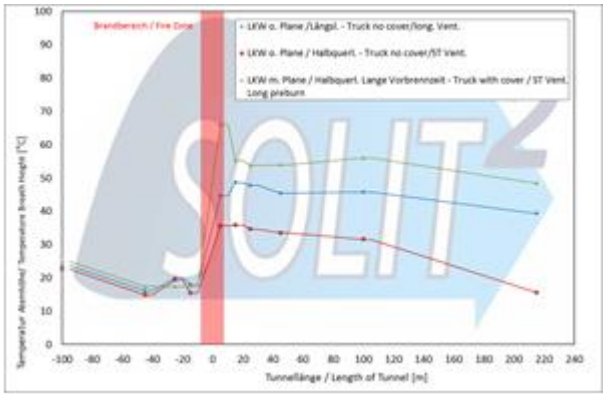


Abb. 28:Temperaturverteilung in Atemhöhe um einen LKW Brand mit aktivierter BBA und verschiedenen Lüftungskonzepten

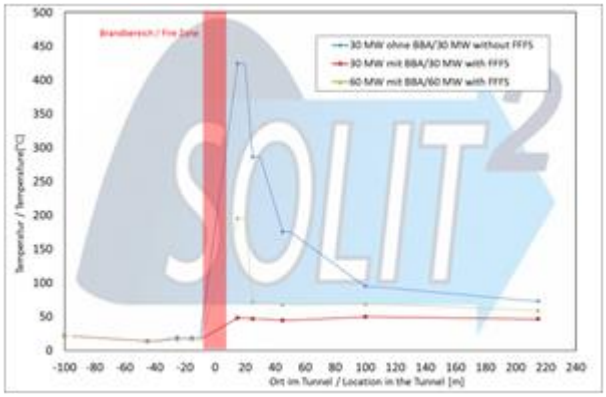


Abb. 29:Temperaturverteilung in Atemhöhe um einen Brand (Klasse B) mit und ohne aktivierter BBA

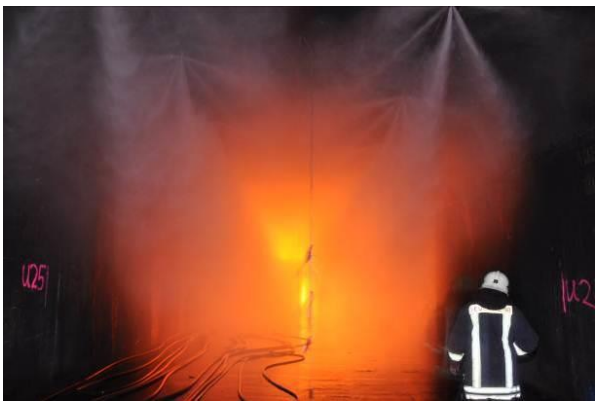


Abb. 30:
Typische Sicht eines Feuerwehrmanns auf den Brandherd aus einer Entfernung von 20 m bei aktivierter Wassernebelanlage

Der Vergleich der Temperaturen mit und ohne aktivierte BBA zeigt sehr deutlich, dass ohne eine

BBA eine Annäherung an den Brandherd gegen die Strömungsrichtung und ein Arbeiten am Brandherd aufgrund der hohen Temperaturen oft nicht möglich ist. Die Feuerwehrtaktik sieht im Normalfall ein Annähern mit der Strömungsrichtung vor.

Hier ist der limitierende Faktor die Wärmestrahlung durch den Brand. Erfahrungsberichten aus der Praxis zeigen auf, dass bei größeren Bränden ein Annähern auf Abstände unter 50 m, auch mit der Ventilationsrichtung, ohne Einsatz einer BBA nicht möglich war. Bei Einsatz von Wassernebel hingegen ist durch die hohe Kühlwirkung und die Absorption der Wärmestrahlung eine Annäherung bis unmittelbar 2m aus jeder Richtung an den Brandherd möglich. Bei der Auswahl der Anlagentechnologie der BBA sollte beachtet werden, dass es nicht zu einer zusätzlichen Gefährdung der Einsatzkräfte, z. B. durch ein Verdecken der Bodenoberfläche oder durch eine erhöhte Rutschgefahr, kommt.

Orientierungsfähigkeit

Auch wenn Einsatzkräfte entsprechend ausgebildet und trainiert sind, um sich im Rauch und unter ungünstigen Sichtbedingungen zu orientieren, sollten auch für die Fremdrettungs- und Brandbekämpfungsphase möglichst gute Sichtbedingungen angestrebt werden. Bei Längslüftungssystemen ist in Strömungsrichtung sowohl für Fälle mit als auch ohne BBA von einer stark beeinträchtigten Sicht auszugehen. Jedoch haben Einsatzkräfte berichtet, dass bei aktivierter BBA durch den helleren Rauch eine bessere Orientierung möglich ist.

Da in der Fremdrettungsphase unter ungünstigen Umständen von einem voll entwickelten Brand auszugehen ist, ist eine Brandgröße zu erwarten, die den Bemessungsbrand für eine Brandfalllüftung übersteigt. Es ist also mit einer massiven Be-

hinderung der Einsatzkräfte zu rechnen. Wie im Abschnitt 3.1 näher beschrieben wird, steigt durch die Aktivierung einer BBA mit großer Kühlwirkung die Effizienz der Brandfalllüftung. Somit kann von einer insgesamt deutlich verbesserten Sichtbarkeit ausgegangen werden. Im Bereich der aktivierten Wassernebelanlage kann es zu einer Einschränkung der Sicht kommen. Diese liegt in der Regel aber über der, die beim Verzicht auf den Einsatz einer BBA zu erwarten ist.

Schutz vor Abplatzungen bzw. herabfallenden Bauteilen

Die Belastung der Tunnelstruktur ergibt sich aus der Temperatur, die durch Wärmestrahlung und Konvektion übertragen wird. Sie wird im Wesentlichen durch die jeweilige Höhe und die Einwirkzeit beeinflusst. Gelingt es diese beiden Faktoren zu reduzieren, wird auch die thermische Belastung des Bauwerks begrenzt. Das Risiko von Abplatzungen und anderen Schäden in der Gefügestruktur des Betons sinkt signifikant. Somit werden Einsatzkräfte vor Verletzungen durch Abplatzungen oder herabfallende Bauteile besser geschützt.

Auf die deutliche Reduzierung der Temperaturen und der Wärmestrahlung sowie eine Verkürzung der Einwirkdauer im Vergleich zu einem freien Brand oder den üblicherweise verwendeten Bemessungsbrandkurven wurde bereits in Abschnitt 2.4.2.1 eingegangen. Betrachtet man die Wirkung innerhalb von Prüfkörpern, zeigt sich ein deutlich verlangsamtes Voranschreiten der Erwärmung im Bauteilinneren.

Einsatz von BBA bei Gefahrgut

Die Wahrscheinlichkeit der Beteiligung eines Gefahrguttransportes an einem Brand ist als gering einzustufen (siehe Abschnitt 2.5.1). Da im Falle einer Freisetzung von Gefahrgütern jedoch mit großen Schadenausmaßen zu rechnen ist, wird diesen Ereignissen im Rahmen der Tunnelsicherheit eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Das Europäische Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße [ADR 2011] sieht in Abhängigkeit von der Gefährdung Beschränkungen für Gefahrguttransporte in Tunneln vor. In Deutschland sind nach dem risikobasierten Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR [BAL 2009] einige Tunnel für bestimmte Gefahrguttransporte gesperrt, da sie die Sicherheitskriterien trotz richtliniengetreuer Ausstattung nicht erfüllen. Häufig sind dabei Transporte von brennbaren Flüssigkeiten (Klasse 3) für die Kategorisierung maßgebend. Bei dem Einsatz von stationären BBA ist deren Wirkung bei Gefahrgutfreisetzungen zu betrachten.

Wechselwirkung zwischen Gefahrstoffen und BBA

Insbesondere Brände mit den am häufigsten auftretenden Gefahrgütern der Klasse 3 können im Brandfall sehr gut durch Wasser basierte BBA beherrscht werden. Durch die Verwendung von Filmbildnern (Aqueous Film Forming Foam, AFFF) lässt sich diese Wirkung noch verbessern. Wasser wirkt darüber hinaus auf viele Gefahrstoffe verdünnend.

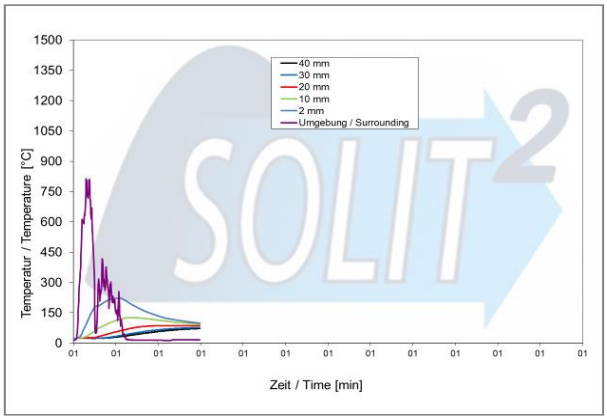


Abb. 31:
Temperaturen in einem Betonprüfling bei einem Brandversuch mit einem LKW und aktivierter BBA

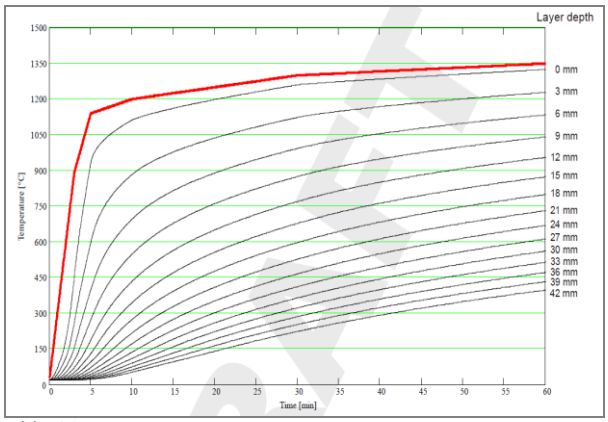


Abb. 32:
Temperaturentwicklung in verschiedenen Betontiefen bei der RWS Kurve

Einzig Gefahrgüter, die in Berührung mit Wasser exotherm reagieren, sind kritisch zu betrachten. Hier ist anzumerken, dass dazu der Gefahrstoff jedoch ausgetreten, das Transportbehältnis also beschädigt sein muss. Untersuchungen [LÄM 2009] haben gezeigt, dass es zwar zu einer exothermen Reaktion im unmittelbaren Umfeld des Stoffes kommt, die Auswirkungen aber durch die BBA wie bei einem Brand kontrolliert werden.

Bei allen Bränden im Zusammenhang mit Gefahrgütern ist der Einsatz der Feuerwehr von grundlegender Bedeutung. Bei einem größeren Brand in einem Tunnel ohne BBA ist unter Umständen der Feuerwehr aber ein zeitnaher und sicherer Zugang zum Brandherd und damit überhaupt erst eine Überprüfung eines Gefahrguttransporters kaum möglich.

Einfluss einer BBA auf die Freisetzungshäufigkeit

Für die erforderliche risikobasierte Betrachtung der Gefahrgutszenarien ist die Freisetzungshäufigkeit von großer Bedeutung. Zu unterscheiden sind dabei primäre und sekundäre Freisetzungen, wobei die Häufigkeit von sekundärer Freisetzung deutlich überwiegt:

- primäre Freisetzungen, bei denen infolge eines technischen Defektes am Transportbehälter oder einer schweren Kollision der Gefahrstoff austritt und sich bei brennbaren Stoffen entzündet.
- sekundäre Freisetzungen, bei denen infolge eines technischen Defekts am Transportfahrzeug oder einer Kollision des Gefahrguttransporters selbst oder in der Nähe des Fahrzeugs ein Brand entsteht, der sich ungehindert ausbreiten kann und auf den Gefahrstoff übergreift.

Bei primären Freisetzungen wirkt eine BBA wie oben beschrieben kühlend und kontrollierend, wobei auch hier sehr große Ereignisse kaum beherrschbar sind.

Werden Gefahrstoffe jedoch erst als Folge eines anderen Initialereignisses freigesetzt (sekundäre Freisetzung), kann dies durch den Einsatz einer BBA, deren Kühlung und Verhinderung des Brandüberschlags, die Freisetzung des Gefahrstoffes verhindern oder deutlich verzögern. Folglich werden die Risiken durch Gefahrguttransporte alleine durch die deutliche Herabsetzung der Eintrittshäufigkeit stark reduziert. Gerade die mit Wasser exotherm reagierenden Stoffe kommen durch den Einsatz einer BBA im Regelfall erst gar nicht mit Wasser in Berührung. Sollte dies aber dennoch der Fall sein, würden exotherme Reaktionen nicht vermieden. Allerdings erfolgt durch die BBA eine Kühlung und Abschirmung der Wärmestrahlung, wodurch der Feuerwehr ein Eingreifen erst ermöglicht würde.

Der Einsatz von BBA in Tunneln kann besonders bei kritischen Tunneln eine Kategorisierung und damit Beschränkung von Gefahrguttransporten verhindern und bei Tunneln die nicht für Gefahrguttransporte beschränkt sind die Sicherheit deutlich erhöhen.

2.5 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von Brandschutzeinrichtungen

2.5.1 Grundlagen zu Bemessungsbrände

Die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Bemessungsbrände sind so gewählt, dass sie für die jeweilige Bauteile oder technischen Einrichtungen maßgebende große Belastungsfälle abdecken, so dass die meisten realen Brände beherrscht werden können. Die Bemessungsbrände basieren auf Brandverläufen, wie sie in der Realität mit großer Wahrscheinlichkeit auftreten.

Brände ohne Beteiligung von Gefahrgütern

Ausgehend von der Ursache eines Brandes können grundsätzlich zwei charakteristische Brandverläufe unterschieden werden.

Der weitaus überwiegende Anteil der Brände entspricht dem klassischen Brandverlauf, der sich am Anfang vergleichsweise langsam entwickelt und sich erst in der sog. Flash-Over Phase schnell zum Vollbrand steigert. Dagegen kommt es ausschließlich bei Flüssigkeitsbränden, die in Form von Lachen-bränden vorkommen können, unmittelbar nach der Zündung zu einer sehr schnellen Entwicklung des Brandes. Abb. 33 zeigt die charakteristischen Brandverläufe und deren qualitative Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Auch wenn die sehr schnell verlaufenden Brände sehr selten sind, können sie für die Bemessung das maßgebende Szenario darstellen, weil sie ihre maximale Temperatur bzw. Energiefreisetzung bereits nach kurzer Zeit erreichen. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass bei Brandversuchen häufig Brandwannen verwendet werden, die aber mit Lachenbränden nur bedingt vergleichbar sind. Weitere Erläuterungen dazu finden sich in Abschnitt 2.5.4.

Brände mit Beteiligung von Gefahrgütern

Etwa 5%–6% des Straßengüterverkehrs sind Gefahrguttransporte. Brände von Gefahrgütern laufen grundsätzlich ähnlich ab, wie konventionelle Brände. Jedoch kann die Brandentwicklung deutlich schneller sein und die Energiefreisetzung deutlich höher sein.

Für brennbare Gefahrgüter müssen die folgenden zusätzlichen Aspekte in eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung und in die Bewertung der Auswirkungen mit einfließen:

- Die Art des Gefahrgutes muss berücksichtigt werden.
- Das Fahrzeug mit Gefahrgut ist nicht am Unfall beteiligt. Hier kann es in Folge einer unkontrollierten Brandausbreitung (ohne BBA) zu einer Beteiligung kommen.
- Das Fahrzeug ist am Unfall beteiligt. Das Gefahrgut tritt nicht aus. Hier kann es ohne eine

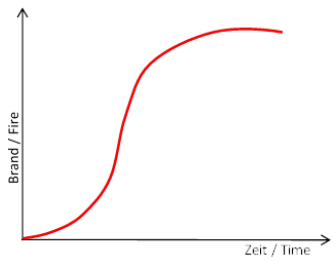
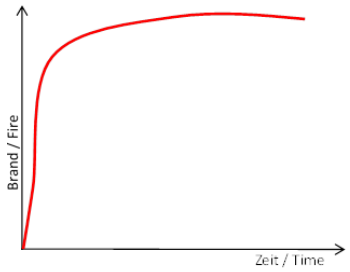
Brände ohne Beteiligung von Gefahrgütern nach ADR (Brandraten)	Brände pro km und Jahr	Brand-rate	Häufig-keits-verteilung	Beispielhafte Ursache	Häufigkeit (Annahme)	Charakteristik des Brandverlaufs
Brände infolge technischem Defekt (ohne Zu/Abfahrten)	3,68E-09	3,00E-09	81,5%	Bremsen überhitzt Reifenbrand Kabelbrand Turbolader überhitzt	100%	
Brände infolge Kollision (ohne Zu/Abfahrten)		6,84E-10	18,6%	Kurzschlusse im Motorraum	überwiegend	
				spontan auslaufende Betriebsflüssigkeiten (Benzin, Öl) die sich z.B. an heißen Fahrzeugteilen entzünden	sehr selten	

Abb. 33:
Übersicht über die Häufigkeit von Brandverlaufen bezogen auf die Ursachen (Quelle Brandraten: [BAS 2009]

Brandkontrolle zu einer Ausbreitung auf das Gefahrgut kommen.
- Das Gefahrgut tritt aus und wird entzündet.
- Der Brand geht vom Gefahrgut aus.

Die üblichen Bemessungsbrände berücksichtigen diese Szenarien aufgrund der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit nicht. Entsprechende Schutzmaßnahmen wären darüber hinaus auch meist unwirtschaftlich und technisch kaum zu realisieren.

2.5.2 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von baulichen Brandschutzmaßnahmen

Konstruktionen und die zugehörigen baulichen Brandschutzmaßnahmen werden im Regelfall anhand von Zeit-/Temperaturkurven dimensioniert. In Deutschland wird dazu die sog. ZTV-ING-Kurve verwendet. Andere bekannte Kurven sind z. B. die niederländische RWS-Kurve, die auch von anderen Regelwerken, wie z. B. der NFPA 502 übernommen wurde.

Diese Kurven stellen in Abhängigkeit von der Zeit die Temperaturen dar, welche auf ein Bauteil potentiell einwirken, wenn ein sich schnell entwickelnder Brand angenommen wird. Die Brandgröße ist dabei nicht definiert.

Bei der Auswahl oder der Modifikation der Zeit-/Temperaturkurven ist zum einem die Höhe der Temperaturen und zum anderen deren zeitlicher Verlauf und damit die Dauer der Einwirkung der jeweiligen Temperaturen auf die Bauteile von großer Bedeutung

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich oder erforderlich, die bestehenden Standardkurven zu modifizieren. Bei einem besonderen Risiko kann es z. B. erforderlich sein, die Einwirkungsdauer zu verlängern.

Durch einen Einsatz einer BBA kann bei Vorliegen entsprechender Nachweise eine Reduzierung der Einwirkungsdauer und/oder der maximalen Temperatur angenommen werden. Die Auswirkungen auf die Anforderungen an Bauteilen und deren Standfestigkeit können dann neu beurteilt werden. Näheres zu diesem Verfahren findet sich im Abschnitt 3.2.3.

2.5.3 Bemessungsbrände zur Dimensionierung der Brandfalllüftung

Die Brandfalllüftung dient ausschließlich zur Rauchfreihaltung des Tunnels und der Rettungswege während der Selbst- und Fremdrettungsphase.

Für die Bemessung der Brandfalllüftung geben die RABT 2006 wie auch andere Regelwerke maximale Brandgrößen von 30–100 MW[23] sowie damit verbundene freigesetzte Rauchgasmengen[24] vor. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass diese Bemessungsbrände nicht die maximal zu erwartenden Brandgrößen und damit Rauchmengen darstellen, sondern lediglich einen gewissen Prozentsatz von Brandereignissen (entweder maximale Brandgröße oder Zeit bis die HRR erreicht wird) abdecken, die in dem spezifischen Tunnel auftreten können.

Weiterhin ist bei der Bewertung der Wirksamkeit der Brandfalllüftung zu berücksichtigen, dass die Planung und Dimensionierung der Brandfalllüftung im Regelfall mit Modellrechnungen erfolgt. Hierbei ist anzumerken, dass die Anwendbarkeit der Modellrechnungen für die Dimensionierung von Brandfalllüftungen nur zu einem geringen Teil mit Brandversuchen im Maßstab 1:1 validiert wird. Es hat sich in verschiedenen Realbrandversuchen im Rahmen von SOLIT und SOLIT² gezeigt, dass z. B. eine stabile Schichtung der Rauchgase über größere Distanzen auch bei einer rechnerisch ausreichend dimensionierten Rauchgasabsaugung nicht immer erreicht werden kann, obwohl dies nach bisheriger Einschätzung zu erwarten gewesen wäre. Dies trifft insbesondere bei größeren Bränden (> 30 MW), in Abhängigkeit vom Tunnelquerschnitt, zu. Die Gründe hierfür liegen unter anderem in den erheblichen Turbulenzen, welche durch den Brand selbst oder durch im Tunnel stehende Fahrzeuge erzeugt werden.

Durch den Einsatz einer BBA besteht die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit einer gegebenen Brandfalllüftung zu erhöhen oder eine gegebene Rauchmenge mit einer geringeren Ventilationsleistung abzuführen. Gegebenenfalls kann auf Rauchgasabsaugungen über eine Zwischendecke verzichtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Einflüsse auf den Brand sowie auf die Temperatur der Rauchgase und damit auf das Rauchvolumen,

[23] In der Regel in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte oder der LKW-Fahrleistung

[24] Zur Bemessung einer Absaugleistung wird die Rauchgasmenge mit einem Durchmischungsfaktor erhöht, der von der Längsströmung abhängt, mindestens jedoch 1,5 beträgt.

kann für die Planung eine reduzierte Bemessungsbrandgröße herangezogen werden. Eine Beschreibung des Verfahrens, welches mit Realdaten verifiziert wurde, findet sich in Abschnitt 3.2.1.

2.5.4 Bemessungsbrände zur Dimensionierung von BBA

Nach dem Stand der Technik lässt sich die Effektivität von BBA ausschließlich anhand von Brandversuchen in einem realen Maßstab überprüfen. Dabei ist es aber nicht notwendig, die Effektivität für jeden Tunnel separat zu prüfen, da in gewissen Grenzen eine Extra- und Interpolation der Daten möglich ist.

Allerdings hat sich gezeigt, dass pauschale Anlagenkenngrößen, wie z. B. Wasserbeaufschlagungsraten, nicht ausreichen, um die Effektivität einer BBA in einem Tunnel zu bewerten. Für erfahrungsbasierte Werte, wie sie z. B. bei Sprühflut- oder Sprinkleranlagen in Industrieanwendungen oder Gebäuden verwendet werden, fehlt bisher eine ausreichende Datenbasis aus Brandversuchen und realen Ereignissen.

Nach dem heutigen Stand der Technik sind CFD-Simulationen, in Abhängigkeit vom verwendeten Code und den Modellannahmen, nur für eine begrenzte Inter- bzw. Extrapolation von Versuchsdaten von BBA in Tunneln geeignet.

In den letzten Jahren haben sich verschiedene Brandszenarien für die empirische Überprüfung der Wirksamkeit von BBA in Tunneln durchgesetzt. Die Wahl eines Brandszenarios sollte mit großer Sorgfalt und anhand von nachvollziehbaren Daten und Risikoanalysen erfolgen, da dies maßgebliche

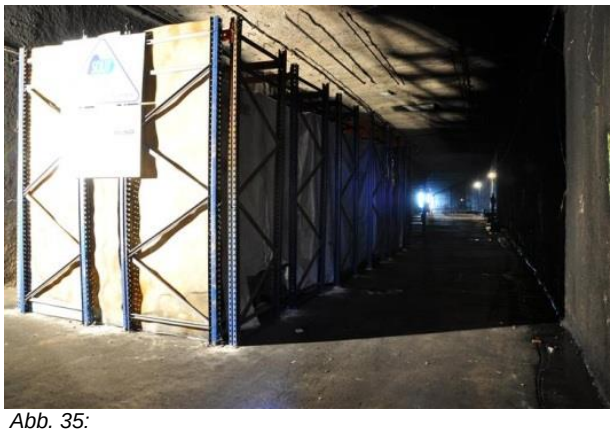


Abb. 35:
Typische Brandlast ohne Unterbau um größeren Abstand zwischen Brandlast und Tunneldecke darzustellen

Auswirkungen auf die technische Ausgestaltung sowie Dimensionierung und damit auf die Kosten des Gesamtsicherheitssystems hat.

Insbesondere beim Vergleich von verschiedenen Varianten der Ausgestaltung eines Tunnelsicherheitssystems müssen gleiche Rangbedingungen zugrunde gelegt werden.

Wie generell bei Echtbrandversuchen, ist bei der Auswahl von Brandszenarien darauf zu achten, dass Brandlasten und -szenarien reproduzierbar sind. Daher ist die Verwendung von Standardbrandlasten, wie z. B. Holzpaletten, realen Fahrzeugen vorzuziehen. Jedoch sollte eine wissenschaftliche Herleitung der Szenarien basie-

Abb. 34:
Typische LKW Brandlast mit einem Unterbau

rend auf einer Risikoanalyse für den betreffenden Tunnel bzw. Tunnelkategorie erfolgen

Feststoffbrände

In der Regel werden für Feststoffbrände Holzpaletten verwendet. Die Abmessungen der Gesamtbrandlast entsprechen dabei dem Ladevolumen eines LKW. Eine typische Brandlast besitzt dabei die folgenden Parameter:

Länge:	10,0 m
Breite:	2,40 m
Höhe der Ladung:	2,50 m
Anzahl Paletten:	~ 408 Stück[25]
Energieinhalt (bei Europaletten):	~ 155 GJ

Wie z. B. auch die Runehamar Brandversuche gezeigt haben [ING 2011], stellen Holzpaletten im Vergleich zu einer typischen LKW Ladung einen ungünstigen Fall und damit einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor bei der Beurteilung der Effizienz einer BBA dar. Eine Abdeckung der gesamten Brandlast, z. B. mit einer LKW Plane wird empfohlen. Da die weit überwiegende Anzahl von Bränden durch kleine technische Ursachen entsteht, wird eine kleine Zündquelle, z. B. ein Poolfeuer mit 20 kW empfohlen.

[25] Für den normalerweise nicht am Brand beteiligten Unterbau zur Simulation des LKW-Fahrgestells wurden weitere ca. 250 Paletten verwendet.

Je nach Ausgestaltung der Brandlast stellt ein hier beschriebener LKW-Nachbau eine potenzielle HRR von 100–200 MW dar. Wegen der im Vergleich zu Flüssigkeitsbränden langsameren Brandentwicklung ist bei Feststoffbränden der Nachweis für eine potenzielle anstelle einer tatsächlichen Brandleistung, die durch die BBA begrenzt wird, sinnvoll. Dies ergibt sich daraus, dass BBA vor Erreichen der maximalen HRR aktiviert werden und eine Begrenzung der maximalen tatsächlichen HRR bewirken.

Flüssigkeitsbrände

Ein weiteres wichtiges Brandszenario zur Überprüfung der Wirksamkeit einer BBA sind Flüssigkeitsbrände zur Abbildung eines Lachenbrandes. Um solche Brandereignisse überhaupt in einer Versuchsumgebung realisieren zu können, werden in der Regel an Stelle von Lachenbränden Wannenbrände durchgeführt. Daraus kann sich bei Versuchen unter anderem eine deutlich längere Branddauer ergeben, als diese in der Praxis zu erwarten wäre. Damit liegt die Bewertung einer BBA hinsichtlich ihrer Eignung zur Reduzierung der Auswirkungen eines Flüssigkeitsbrandes (Rauchgasbildung, Temperaturen etc.) auf der „sicheren Seite“.

Um eine realistische Bewertung der Wirksamkeit einer BBA zu ermöglichen, müssen auch hier die Brandszenarien hinsichtlich Größe und Auftretenswahrscheinlichkeit mit einer Risikoanalyse bestimmt werden. Dabei gilt es unter anderem folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Ein typischer LKW besitzt 2 Treibstofftanks mit einem Fassungsvermögen von je ca. 400–1.000 l [SCA 2012]. Es ist unwahrscheinlich, dass der maximale Inhalt beider Tanks gleichzeitig, z. B. durch eine Ruptur austritt. Demnach tritt nur eine begrenze Dieselmenge aus den Kraftstofftanks eines LKW aus.
- Die Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR[26] ist durch gesonderte Risikoanalysen geregelt. Szenarien, bei denen große Mengen von Gefahrstoffen freigesetzt werden, sind im Regelfall nicht durch technische Sicherheitsmaßnahmen beherrschbar. Zu unterscheiden sind diesbezüglich Freisetzungen infolge primärer Ereignisse (Kollision mit Aufreißen eines Tanks) oder infolge sekundärer Ereignisse (Brand des Fahrzeugs durch technischen Defekt mit Übergriff auf den Gefahrstoff).

Auslaufende Flüssigkeiten werden im Tunnel durch die Fahrbahnquerneigung und die seitlichen Schlitzrinnen abgeführt, wodurch ein Ansammeln größerer Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn begrenzt wird. Eine großflächige Verteilung des Brennstoffes ist daher sehr unwahrscheinlich. Zudem ist der sich auf der Fahrbahn ansammelnde Brennstoff aufgrund der geringen Schichtdicke in kurzer Zeit abgebrannt.

Dennoch ist es sinnvoll die Wirksamkeit der BBA auch anhand von Flüssigkeitsbränden zu überprüfen. Aufgrund der oben genannten Aspekte wird üblicherweise eine Brandgröße von bis zu 50–100 MW zur Überprüfung der Eignung der BBA herangezogen werden.

Grundsätzlicher Ablauf

Für die Wirkungsweise und deren Überprüfung ist der Zeitpunkt der Aktivierung der BBA von entscheidender Bedeutung. Nach den RABT oder vergleichbaren Vorschriften muss die Branderkennung eines offenen Flüssigkeitsbrandes von 5 MW, z. B. mittels eines linearen Wärmemelders, in der Regel innerhalb von 1 Minute erfolgt sein. Auch wenn in der Realität Sichttrübungsgeräte für einen sehr schnellen Voralarm verwendet werden, ist für das entsprechende LKW-Brandszenario die Zeit bis zur Branderkennung zu ermitteln.

Bei einem Flüssigkeitsbrand kann eine Vorbrennzeit von 1 Minute angenommen werden. Jedoch sollte dabei berücksichtigt werden, dass der Brand unter Umständen noch nicht seine maximale HRR erreicht hat.

Die Dauer des Brandversuches soll mindestens die Zeit bis zum Eingreifen der Feuerwehr umfassen. Sie soll auf realistischen, die örtlichen Verhältnisse berücksichtigende Annahmen basieren, jedoch mindestens 30 Minuten dauern.

Eine ausführliche Beschreibung zur Durchführung von Brandversuchen und der empfohlenen Messtechnik und Dokumentation findet sich im Anhang 7.

[26] Europäisches Übereinkommen über die Beförderung von gefährlichen Gütern auf der Straße

2.6 Grundlagen zur Kompensation von Sicherheitssystemen.

Jedes Sicherheitssystem hat die Aufgabe, alleine oder in der sinnvollen Kombination mit anderen Systemen Schutzziele, wie z. B. die Ermöglichung der Selbstrettung oder den Schutz des Bauwerkes, zu erreichen.

Regelwerke, wie z. B. die RABT, schreiben konkrete technische Maßnahmen vor, mit denen ein zum Zeitpunkt der Betrachtung und für den individuellen Tunnel spezifisches Sicherheitsniveau erreicht wird. In der Regel basieren solche normativen Ansätze auf anerkannten Regeln der Technik, die sich in der Praxis bewährt haben.

In bestimmten Fällen können dem Regelwerk entsprechende Maßnahmen aufgrund äußerer Randbedingungen[27] nicht vollumfänglich umgesetzt werden oder eine notwendige Erhöhung des Sicherheitsniveaus[28] lässt sich regelwerkskonform nicht oder nur mit einem unverhältnismäßig hohen Mehraufwand erreichen.

In diesen Fällen, wie auch in anderen Bereichen der Technik (z. B. der Sicherheit von Schienenfahrzeugen), sind Abweichungen von normativen Regeln zulässig, wenn ein fundierter Nachweis gleicher Sicherheit geführt werden kann. Folglich muss in solchen Fällen nach alternativen Lösungen gesucht werden, mit denen die Defizite ausglichen werden können und mindestens das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird. Diese Substitution einer vorgeschriebenen notwendigen Maßnahme durch andere Maßnahme wird Kompensation bezeichnet [THE 2012].

Das Ziel einer Kompensation einer notwendigen Maßnahme kann sein:

- eine Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei vergleichbaren Kosten, oder
- das erforderliche Sicherheitsniveau beizubehalten, die Gesamtkosten dafür jedoch zu senken.

Abb. 36: Kompensation – Kosten für Sicherheitsmaßnahmen und Sicherheitsniveau [KRA 2008]

Seit einigen Jahren setzt sich durch eine Weiterentwicklung der Methoden und durch immer komplexere Anforderungen ein sogenannter „schutzzielorientierter Ansatz“ für die Planung von Sicherheitssystemen durch. Ausgehend von einem definierten Sicherheitsniveau können Schutzziele nicht nur durch die in den Regelwerken beschriebenen Maßnahmen erreicht werden, sondern auch durch eine geeignete Kombination von anderen Maßnahmen, solange dabei ein gleiches oder höheres Sicherheitsniveau erreicht wird (vgl. Abb. 36).

Bei dem Ersatz von Maßnahmen, die dem Stand der Technik entsprechen, durch neue oder einer Kombination von Maßnahmen ist ein Nachweis der gleichen Sicherheit notwendig. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich im Abschnitt 3.3.

2.7 Methoden der Sicherheitsbewertung

Zur Sicherheitsbewertung bzw. Risikoabschätzung ist grundsätzlich eine Vielzahl von Methoden möglich. Diese reichen von reinen Expertenrunden, bei denen ein Tunnel qualitativ bewertet wird, über andere qualitative und semiquantitative Verfahren bis hin zu quantitativen Verfahren. Diese werden alle in der Praxis, je nach Mitgliedsstaat der EU und Verfahrensstufe, angewandt.

Für viele Fragestellungen haben sich wegen der komplexen Zusammenhänge in der Praxis zur Ermittlung von zuverlässigen Ergebnissen quantitative Verfahren durchgesetzt. Diese erfordern eine Methodik, die eine Quantifizierung der Gefahren ermöglicht. Dazu ist die Beantwortung folgender drei Basisfragen erforderlich:

- Was kann sich ereignen?
- Wie häufig kann es eintreten?
- Was sind die Auswirkungen?

[27] Dies können geometrische, geologische, bauliche, wirtschaftliche oder andere Randbedingungen sein.

[28] Auf Basis einer Sicherheitsbewertung, z. B. durch geänderte Regelwerke oder besondere Anforderungen

Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt mittels quantitativer Risikoanalysen, wodurch nachfolgend aufgeführte Arbeitsschritte notwendig werden:

1. Ablaufmodellierung
2. Häufigkeitsermittlung
3. Schadensausmaßermittlung
4. Risikoermittlung
5. Risikobewertung

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz beschrieben:

Ablaufmodellierung

Ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis, Top Event) werden Ereignisabläufe mit Hilfe von Ereignisbäumen generiert. Wesentliches Merkmal dieser Ereignisabläufe ist die transparente Darstellung über sämtliche, mögliche Zwischenzustände, bis hin zum jeweiligen Endzustand. Initialereignisse können beispielsweise ein Unfall mit dem anschließenden Auslaufen von brennbaren Flüssigkeiten oder das Entstehen eines Brandes durch einen technischen Defekt sein.

Häufigkeitsermittlung

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

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

$H_{e,i}$: *Häufigkeit der Endzustände*
H_0: *Eintrittshäufigkeit des Initialereignisses*
P_i: *Verzweigungswahrscheinlichkeiten P im Zweig i*

Für diese Berechnung werden die Häufigkeiten des auslösenden Ereignisses und der Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten benötigt. Diese werden z. B. für das Initialereignis aus empirischen Werten und für die Verzweigungswahrscheinlichkeiten mit Hilfe von statistischen Grundlagen, generischen Methoden (z. B. Fehlerbäumen) oder Annahmen bestimmt.

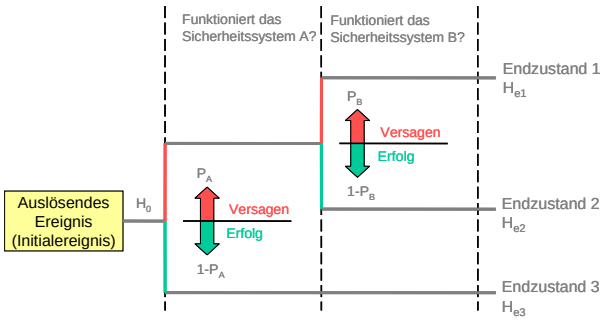


Abb. 37
Beispiel für einen Ereignisbaum

Schadensausmaßermittlung

Die Ermittlung von Schadensausmaßen erfordert i. d. R. die Anwendung von Ausbreitungs- und Wirkungsmodellen oder anhand von Erfahrungswerten aus realen Versuchen und Ereignissen. Je nach erforderlichem Detaillierungsgrad kommen dabei in der Praxis unterschiedliche Modelle zum Einsatz. Neben vergleichsweise einfachen Hilfsmitteln (z. B. Abschätzungen über Nomogramme) kommen auch komplexe Rechenmodelle mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zum Einsatz. So lassen sich beispielsweise mit Hilfe von CFD-Modellen Auswirkungen eines freien Brandes anhand der Parameter Temperatur, Wärmestrahlung, Strömungsgeschwindigkeit und Gaskonzentrationen raum- und zeitabhängig abschätzen. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass CFD-Simulationen mit entsprechenden Daten aus realen Brandversuchen kalibriert werden müssen, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten.

Durch eine Überlagerung der Daten mit den festgelegten Parametern für die entsprechenden Schutzziele (vgl. Abschnitt 2.2) kann auf das jeweilige Schadensausmaß geschlossen werden. Im Fall der Ermöglichung der Selbstrettung können dies zum Beispiel Evakuierungs- und Entfluchtungsmodelle mit expositionsabhängigen Sterblichkeiten sein.

Werden nun Sicherheitsmaßnahmen ergriffen, so ändert sich auch das Schadensausmaß in einem Ereignisfall. Wird z. B. eine BBA vorgesehen, so muss das Schadensausmaß bei einem Brand anhand der Daten aus Brandversuchen und aus ggf. durchgeführten Inter- bzw. Extrapolationen mit Hilfe von CFD-Simulationen neu ermittelt werden.

Risikoermittlung

Als Maß für das Gefährdungspotential dient das Risiko, welches sich aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten der Endzustände mit dem jeweiligen Schadensausmaß ergibt.

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

m: *Anzahl der Endzustände im Ereignisbaum*
$H_{e,i}$: *Häufigkeit der Endzustände*
$A_{e,i}$: *Schadensausmaß für jeweiligen Endzustand*

Die quantitative Darstellung des Risikos kann als Punktwert (Erwartungswert für das kollektive Risiko) oder über ein Summenhäufigkeitsdiagramm erfolgen (siehe Abb. 38). Der Schadenerwartungswert entspricht dabei der Fläche unter der Summenhäufigkeitskurve.

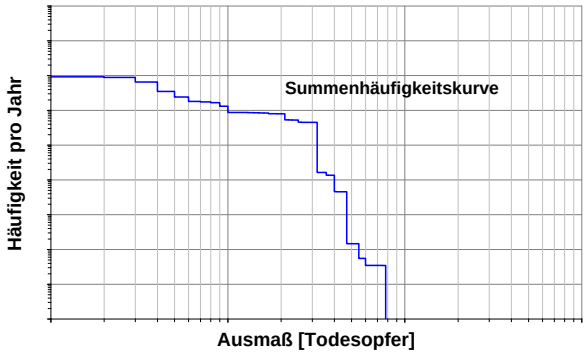


Abb. 38
Summenhäufigkeitsdiagramm am Beispiel von Todesopfern

Risikobewertung

Die Bewertung von Risiken erfordert die Definition eines Restrisikos als Vergleichsmaßstab. Dies können entweder relative Vergleichsbetrachtungen mit anderen Ausführungsvarianten eines Tunnelsicherheitssystems oder aber festgelegte Risikoakzeptanzlinien sein (vgl. Beispiel in Abb. 39).

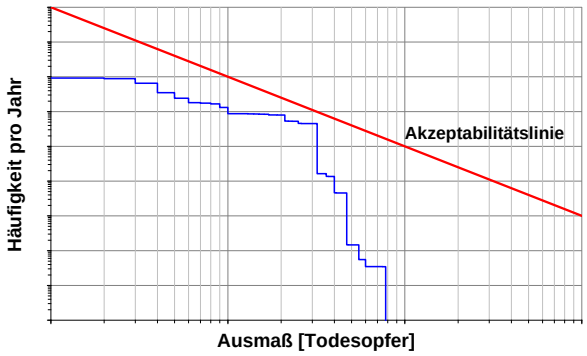


Abb. 39
Risikoakzeptanzkurve als Sicherheitskriterium für Industrieanlagen in den Niederlanden

Für einen Relativvergleich wird die Risikoakzeptanzlinie durch eine Summenhäufigkeitskurve einer anderen Ausstattungsvariante, z. B. mit Verwendung einer BBA, ersetzt und bewertet.

2.8 Grundlagen der Ermittlung von Lebenszykluskosten (LZK) bei Tunnelbauwerken

Bei Tunneln handelt es sich nicht um Serienprodukte, sondern vielmehr um Einzelfertigungen, die an die Spezifikationen des Bauherrn und an die Umfeld bezogenen, beispielsweise geologischen oder infrastrukturellen Gegebenheiten angepasst sind. Aufgrund der Einzigartigkeit eines jeden Tunnelbauwerkes ist es nicht möglicheinen allgemeine Bauwerks-Prototyp zu definieren, allenfalls können einzelne Einflussgrößen, etwa die Tragfähigkeit des Baugrundes durch Pfahlprobebelastungen oder die Schwankungen des Grundwassers vorab abgeschätzt werden. Dem Bauherrn und seinen technischen Beratern kommt daher die Aufgabe zu, das Bauwerk sowie die daran gestellten Anforderungen umfassend durch Beschreibungen und Zeichnungen zu präzisieren. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist sodann, gegebenenfalls unter Einbeziehung weiterer Fachplaner, in aufeinander aufbauenden Schritten die bestmögliche Umsetzungsstrategie zu ermitteln und als ausführungsreife Planung auszuarbeiten. Der Lebenszyklus eines solchen Bauwerks wird zumeist mit nicht weniger als 100 Jahren taxiert. Für Deutschland werden beispielsweise im Rahmen der Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV) je nach Nutzungskonzept (Bahn/Straße) und Bauart (offen/geschlossen) ganz unterschiedlich angesetzt.

Durch den steigenden Bedarf an Sicherheit der Tunnelnutzer nimmt auch der Bedarf an Betriebstechnik zu. Darüber hinaus wird diese auch für den sogenannten Normalbetrieb verwandte Betriebstechnik sukzessive komplexer. Spezifische Einzelkomponenten wie beispielsweise Beleuchtungs- und Belüftungssysteme, Türanlagen, Bauteilbeschichtungen oder elektronische Mess- und Regeltechnik, unterliegen einem separaten Lebenszyklus, der möglicherweise deutlich von der sehr langen Nutzungsdauer des konstruktiven Rohbaus (Beton, Stahl, Mauerwerk) abweicht. Neben turnusmäßigen Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten werden daher in Zeitintervallen in der Größenordnung mehrerer Jahrzehnte umfassende Bauwerkssanierungen notwendig. Hierbei stellt sich heraus, ob Einzelkomponenten weiter betrieben werden können oder ob ganze Komponentengruppen durch neue Produkte ersetzt werden müssen. So beinhaltet der Lebenszyklus eines Einzelproduktes implizit auch immer die Gefahr, dass benötigte Bauteile nicht mehr am Markt verfügbar sind oder der garantierte Zeitraum zum Bezug von Ersatzteilen bereits abgelaufen ist. Infolge der computergestützten Betriebstechnik muss in Betracht gezogen werden, dass die Kompatibilität zwischen der im Bauwerk installierten Komponenten und Technologien neuester Generation nicht mehr gegeben ist und zwangsläufig der Austausch ganzer Systeme notwendig wird.

In Abb. 40 ist ein fiktives Projekt dargestellt. Aus dieser Abbildung ist auch zu entnehmen, dass bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken zwischen den Phasen A – D (Entwicklung, Bau, Bewirtschaftung, Verwertung) zu unterscheiden ist. Die Phase C („Bewirtschaftung“) ist vor dem Hintergrund zu betrachten, dass sie im

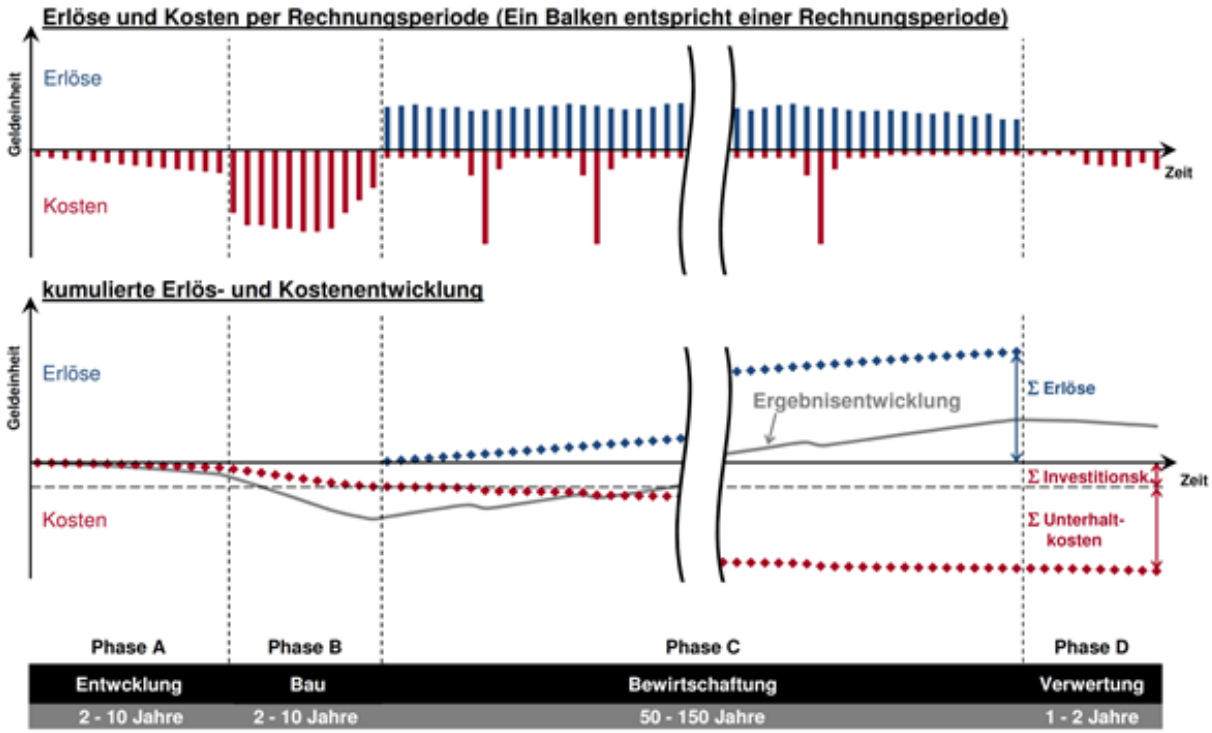


Abb. 40
Das Bauwerk und sein Lebenszyklus, ausgedrückt anhand von Kosten und Erlösen

Vergleich zu allen übrigen Phasen einen sehr langen Zeitraum – in der Größenordnung eines Jahrhunderts – abbildet.

Das obere Diagramm stellt die Kosten pro Rechnungsperiode – beispielsweise innerhalb eines Quartals oder eines Jahres für Energie oder recht seltene Sanierungsaufwendungen – qualitativ dar. Die Erlöse pro Rechnungsperiode spiegeln die gegebenenfalls vorhandenen Einnahmen wider (trifft für Verkehrsinfrastrukturen nur bei privat betriebenen Tunneln zu). Sie können aber unter Umständen auch in Form gesamtvolkswirtschaftlicher Erlöse beispielsweise durch Fahrzeitverkürzungen ausgedrückt werden. Das untere Diagramm zeigt die Summenkurven für Kosten und Erlöse über den gesamten Bauwerkslebenszyklus; aus der Differenz dieser beiden Summenkurven ergibt sich die in grau dargestellte Ergebnisentwicklung. Ist das Ende des Lebenszyklus erreicht, so können, wie ebenfalls im unteren Diagramm aufgetragen, die Lebenszykluskosten als Summe aus den Investitions- und Unterhaltskosten direkt abgelesen werden. Diese Methodik kann auch für unterschiedliche Ausstattungsvarianten angewandt werden.

2.8.1 Systematik

Zunächst sind alle Kostenverursacher nach Entstehungszeitpunkten und Kostenhöhen zu identifizieren. Etwa für den Kostenverursacher „Beleuchtung“ fallen mehrmalig Kosten zur Erneuerung der Beleuchtungsanlage, zur Beschaffung von Austauschleuchtmitteln sowie kontinuierlich für die Energie zum Betrieb der Beleuchtung an. Diese Kosten sind sinnvoll über den geplanten Bewirtschaftungszeitraum des Bauwerks zu verteilen. Bestenfalls kann dabei auf vorliegende Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, wahrscheinlicher ist es jedoch, dass beispielsweise Nutzungsdauern technischer Einbauteile und Energiekosten abgeschätzt werden müssen. Letztendlich ist also die gesamte wirtschaftliche Entwicklung eines Bauwerks im Vorfeld zu beschreiben, indem jeder Kostenverursacher für jede Phase mit Kosten verknüpft wird. Dies lässt sich natürlich auch für alle anderen Sicherheitseinrichtungen, zum Beispiel der Brandfalllüftung, baulichen Brandschutzmaßnahem oder einer BBA durchführen. Die Summe aller Kosten, nämlich die Summe aus Investitions- und Unterhaltskosten über den Existenzzeitraum des Bauwerks, werden als die Lebenszykluskosten[29] bezeichnet.

[29] im Englischen ”Life Cycle Costs” oder “Whole Life Costs”

2.8.1.1 Entwicklung eines Lebenszyklusansatzes für Tunnelbauwerke

In der öffentlichen Wahrnehmung werden die Kosten für große, von der öffentlichen Hand finanzierte Tunnelprojekte meist nur mit den einmaligen Investitionskosten verbunden. Gleichwohl sind für den Bauherrn oder den Bauwerksbetreiber auch die Kosten von großer Bedeutung, die infolge der langfristigen Bewirtschaftung eines Tunnelbauwerks entstehen. Sollen Bau und Betrieb eines Tunnelbauwerks auf den Grundzügen eines Lebenszyklusmodells basieren, so sind einige zentrale, weit in die Zukunft gerichtete Fragestellungen, so wie sie aus nachfolgender Abbildung hervorgehen, von den Projektverantwortlichen zu beantworten.

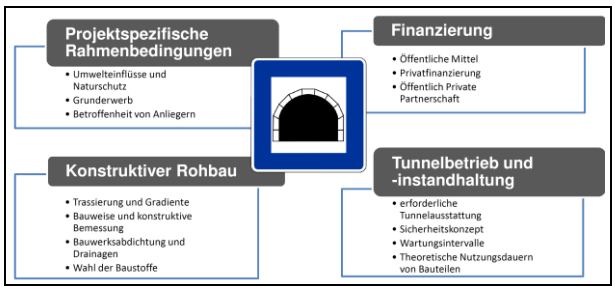


Abb. 41
Aspekte, die bei der Planung eines Tunnels zu beachten sind

Bei der Abschätzung des ökonomischen Gesamtaufwandes für ein spezifisches Vorhaben werden neben den direkten Kosten – also den Lebenszykluskosten – in der Regel noch weitere wirtschaftliche Aspekte untersucht: Für ein Straßentunnelprojekt könnten dies beispielsweise volkswirtschaftliche Kosten sein, die sich aus Fahrzeitverkürzungen oder aus der Optimierung von Warenströmen ergeben. Aber auch Auswirkungen auf das unmittelbare Umfeld, wie Gefahren für Umwelt, Anwohner und Bauwerksnutzer sind dabei zu berücksichtigen. Es handelt sich hierbei um die sog. indirekten Kosten.

Zu berücksichtigen ist weiterhin der Einfluss, den die Verfügbarkeit des Bauwerks auf seine Umgebung und den korrespondierenden volkswirtschaftlichen Anteil besitzt, vor allem, sofern das Bauwerk in Folge eines Unfalls mit Schäden für die Konstruktion für einen längeren Zeitraum geschlossen bleiben muss. Hierbei sind Dauer und Umfang der Behinderung bzw. Schließung, die in der Regel vom Schadensausmaß eines Ereignisses abhängen, von großer Wichtigkeit.

2.8.1.2 Beschreibung von Effizienzvorteilen in Abhängigkeit von der jeweiligen Projektphase

Wird ein Tunnel beispielsweise im Zuge einer Generalsanierung mit einer neuen Innenschale ausgestattet, so kann dieser Tunnel nach Abschluss der Rohbau- und Ausstattungsarbeiten, die mit einer Anpassung an die aktuelle Regelwerkslage verbunden sind, als gleichwertig zu einem Tunnelneubau angesehen werden. Vortriebs- und Grunderwerbskosten, wie sie beispielsweise in erheblichem Maße beim Bau eines neuen Tunnels anfallen, entfallen bei dieser Maßnahme. Die Langlebigkeit von Tunnelkonstruktionen und das damit verbundene, zuvor erläuterte Potenzial, Tunnel im Zuge einer Generalsanierung grundlegend zu modernisieren, lassen erkennen, dass der Lebenszykluskostenansatz ein Werkzeug darstellt, dessen Anwendung nicht nur auf Tunnelneuplanungen zu beschränken ist. In Abhängigkeit davon, in welcher Phase sich ein Tunnelprojekt befindet, ergeben sich die folgenden Einstiegsmöglichkeiten in eine Lebenszyklusbetrachtung:

Neuplanung eines Tunnels

Aufgabe der Planungsingenieure ist es, die technisch optimale Gestaltung des Bauwerks unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu ermitteln. Hier kommt es nicht nur darauf an, das geeignete Tunnelbauverfahren zu wählen, sondern auch über die Bauphase hinaus die betriebs- und turnusmäßig anfallenden Instandhaltungs- und Sanierungskosten in den Fokus zu rücken und alternative Lösungskonzepte zu bewerten. Bereits in einer frühen Planungsphase sollte geprüft werden, ob Betriebstechnik einen entscheidenden Einfluss auf den Rohbau haben kann. Dies kann zum Beispiel bei der Wahl des Lüftungskonzeptes oder der Integration einer BBA der Fall sein. Ziel ist es dabei, das Optimum aus Investitions- und Unterhaltskosten zu ermitteln.

Bestandstunnel im Betrieb

Bei einem Bestandsbauwerk liegt das Hauptaugenmerk darauf, Betriebs-, Instandhaltungs- und Sanierungskosten zu optimieren und geeignete Zeitpunkte für Modernisierungen und Sanierungen zu bestimmen. Eine wichtige Datengrundlage stellt die dem Tunnelbetreiber vorliegende Kostenhistorie dar, da sie ein sehr detailliertes Bild der bisherigen, für das spezifische Bauwerk aufgewendeten Ausgaben widerspiegelt. Der potentielle, jedoch mutmaßlich beschränkte Rahmen, Planungsentscheidungen, die in der Vergangenheit getroffen wurden, im Sinne eines Lebenszyklusansatzes zu korrigieren, ist durch Kosten-Nutzen-Untersuchungen zu verifizieren.

Status Tunnelbauwerk		
1. Tunnelneubau 1.1 Öffentliche Hand 1.2 Betreibermodell (Öffentlich Private Partnerschaft, ÖPP) 1.3 Privater Investor	**2. Bestandstunnel im Betrieb** 2.1 Privatisierung (ÖPP) 2.2 Philosophiewechsel bei der Öffentlichen Hand 2.3 sich abzeichnender Sanierungsbedarf	**3. Tunnelumnutzung** 3.1 Umnutzung 3.2 Generalsanierung 3.3 Außerbetriebnahme 3.4 Verkauf 3.5 Abriss / Rückbau
Ziel: langfristig optimales Verhältnis zwischen Initial- und Folgekosten ermitteln!	Ziel: Betrieb, Instandhaltung und Sanierungsbedarf unter Nutzung der Kostenhistorie optimieren!	Ziel: langfristige / kurzfristige Strategieentscheidung treffen!

Abb. 42
Status eines Tunnelbauwerks und Ziel der Lebenszykluskostenbetrachtung

Tunnelumnutzung

Auch im Falle, dass ein Tunnelbauwerk eine Umnutzung erfahren soll, ist die Aufstellung eines Lebenszykluskostenmodells durchaus sinnvoll. Ein mögliches Szenario ist beispielsweise die Umwandlung eines Eisenbahn- in einen Straßentunnel, wie dies beim im Jahr 1937 eröffneten, 6.872 Meter langen Maurice-Lemaire-Tunnel in Frankreich im Jahr 1976 geschehen ist. Hierbei handelt es sich zweifelsohne um sehr spezielle Anwendungsfälle, für die vertiefte, insbesondere wirtschaftliche Betrachtungen unerlässlich sind. Die Tunnelumnutzung ist in der Praxis nur in Einzelfällen von Bedeutung.

Aus den zuvor genannten Szenarien geht hervor, dass ein Philosophiewechsel vom bedarfsorientierten Investitionsverhalten hin zur Investitionsplanung nach der Lebenszyklusmethode zu ganz unterschiedlichen Zeiten erfolgen kann und grundsätzlich aus ökonomischen Überlegungen heraus resultiert. Die in der nachfolgenden Tabelle den zuvor erläuterten Phasen „Tunnelneubau“, „Bestandstunnel im Betrieb“ und „Tunnelumnutzung“ untergeordneten Richtungsentscheidungen können als Einstiegspunkte in eine Lebenszykluskostenbetrachtung angesehen werden.

Der Lebenszyklus eines Tunnelbauwerks wird, wie bereits verdeutlicht, durch eine Vielzahl von Einflüssen bestimmt. Zu unterscheiden ist dabei einerseits zwischen Einflüssen, die bereits während der Planungsphase bekannt sind, andererseits wirken externe, vorab nicht quantifizierbare und z. T. unbekannte Einflüsse auf das Bauwerk ein. Allen Einflüssen ist gemein, dass sie sich direkt auf den Lebenszyklus, und somit auf die Gesamtlebenszykluskosten des betrachteten Tunnels auswirken. Beherrschbare Einflüsse sind beispielsweise Einwirkungen aus der Geologie und der Hydrogeologie, die letztlich die Grundlage zur statischen Dimensionierung des Bauwerks darstellen. Besondere, nicht vorhersehbare Ereignisse in Tunnelbauwerken stellen Unfälle, Naturgefahren oder Terroranschläge dar.

Faktoren, wie die Anpassungen technischer Normen und Richtlinien, können zudem Kosten verursachen, die zum Zeitpunkt der Lebenszykluskostenberechnung nicht oder nur ansatzweise quantifizierbar und bewertbar sind. Änderungen in der Fiskal- und Zinspolitik sowie die Entwicklung der Inflationsrate sind über einen Zeitraum von 80 bis 100 Jahren nicht zuverlässig abschätzbar. Ebenso unterliegen Baustoff-, Energie- und Personalkosten nur schwer zu prognostizierenden Preissteigerungen.

Lebenszyklus Tunnelbauwerk		
Tragwerk - Bewehrter / unbewehrter Beton bzw. Spritzbeton - Fahrbahnaufbau - Stahl - Einbauteile aus sonstigen Materialien	**Betriebstechnische Komponenten** - Energieversorgung - Leittechnik - Sicherheitstechnik - Kommunikationstechnik - Überwachungstechnik	**Externe Einflüsse** - Geologie - Hydrogeologie - Unvorhersehbare Ereignisse, wie Unfälle, Naturgefahren, Terror - Regelwerksänderungen

Abb. 43
Einflüsse, die sich auf den Lebenszyklus eines Tunnels auswirken

2.8.1.3 Berücksichtigung von Wartung und Instandhaltung

Die Wartung und Instandhaltung eines Bauwerks kann erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer einzelner Komponenten und des Bauwerks als Ganzes haben. Verdeutlicht wird dies durch die Graphen in Abb. 44.

Im linken Graph liegt zum Zeitpunkt t_1 ein Schaden an einem Ausrüstungsgegenstand bzw. Bauteil vor, der in der Folge zu einer deutlichen Verringerung der erreichbaren Lebensdauer des Details führt. Proaktive Maßnahmen, welche zeitlich noch vor dem Zeitpunkt des Schadenseintritts liegen, können diesen Zustand verhindern helfen und so zu einer Verlängerung der Lebendauer des Details führen. Wichtig ist die Implementierung dieses Zusammenhangs im Rahmen der Lebenszykluskostenevaluierung. Die monetäre Differenz zwischen der notwendigen Investition zum Austausch des Details bei Erreichen des Zeitpunkts T und der Kosten für die proaktive Maßnahme entspricht dann dem Nutzen der Maßnahme, welcher jedoch nur im Rahmen einer vollständigen Analyse berücksichtigt werden kann.

2.8.1.4 Besonderheiten von BBA bei der Berücksichtigung im Rahmen von LZK-Analysen

Da es sich bei BBA um hochtechnische Anlagen handelt, die speziellen Anforderungen hinsichtlich der Wartung und Instandhaltung genügen müssen, für die gleichwohl für den Einsatzbereich des Straßentunnels bislang nur in beschränktem Ausmaß Kennwerte für Lebensdauerintervalle von Einzelkomponenten etc. vorliegen, sind genaue Analysen der Wartungsabläufe nötig. Engmaschige Wartungsintervalle sind unabdingbar um eine hohe Verfügbarkeit der BBA gewährleisten zu können. Die Wartungsintervalle sind so anzupassen, dass diese unter keinen Umständen die Verfügbarkeit des Tunnels beeinträchtigen, da dies volkswirtschaftliche Folgen und wirtschaftliche Folgen für den Betreiber nach sich ziehen kann.

Folgende beispielhafte Parameter sind mittels LZK Analyse ggf. zu bewerten:

- Anpassen der präventiven Maßnahmen für die BBA an tunnelseitigen Wartungsintervallen (beispielsweise auf Basis der DIN 1076 in Verbindung mit der RI-EBW-PRÜF, im Falle eines Straßentunnels)
- Ausfallwahrscheinlichkeiten der BBA-Komponenten
- Dauer der erforderlichen präventiven Maßnahmen
- Instandhaltbarkeit der BBA-Komponenten
- Erforderlicher Umfang der Wartungsarbeiten
- Zugänglichkeit der BBA-Komponenten
- Kosten für Austauschteile
- Reinvestitionsintervalle

2.8.2 Methoden zur Berechnung von LZK

Für die Berechnung der unter den oben formulierten Randbedingungen ermittelten Lebenszykluskosten stehen je nach Land verschiedene Rechenmodelle und Herangehensweisen zur Verfügung. In Deutschland greifen beispielsweise die Randbedingungen der sogenannten „Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung“ (ABBV), herausgegeben durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Alternativ können zu den hier üblichen Rechenverfahren (bspw. Kapitalwertmethode, Annuitätenmethode) auch vollständige Investitionskostenrechnungen angestellt werden, die zwar deutlich komplexer sind, sich jedoch vor dem Hintergrund der Implementierung von Unschärfen empfehlen. Speziell für Straßentunnel sollten die Vorgaben der PIARC berücksichtigt werden. Hierbei sind die folgenden Berichte zentral zu beachten:

- AIPCR.06.08.B-2004: Planning and Programming of Maintenance Budgets
- PIARC.05.13.B-2005: Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels
- PIARC.05.06.B-1999: Reduction of Operating Costs of Road Tunnels
- PIARC 2008R15: Urban road tunnels – Recommendations to managers and operating bodies for design, management, operation and maintenance

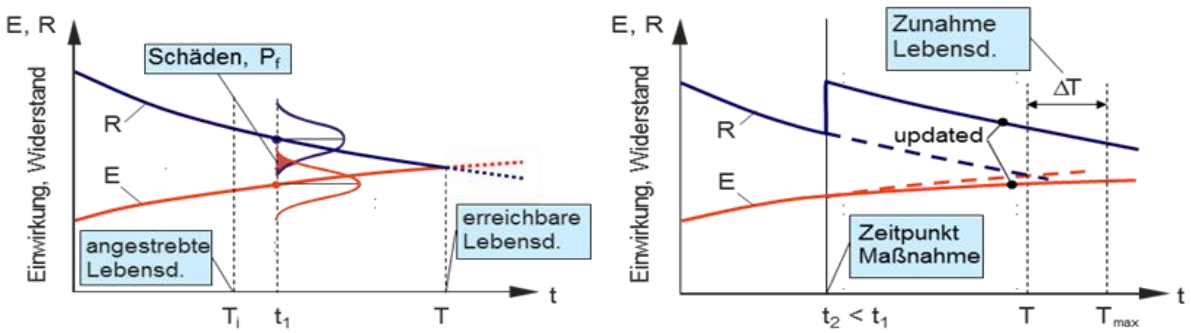


Abb. 44
Verhältnis von Widerstand und Einwirkung in Abhängigkeit von proaktiven Maßnahmen zur Schadensverhütung

Darüber hinaus wird die Berücksichtigung der nachfolgenden internationalen Standards empfohlen:

- ISO 15686: Buildings and constructed assets - Service life planning
- IEC 60706: Maintainability of equipment
- IEC 61709: Electronic components – Reliability – Reference conditions for failure rates and stress models for conversion
- IEC 61508: Functional Safety
- EN 60300-3-3: Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing
- EN 13306: Maintenance terminology
- DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung (Fundamentals of maintenance)

Teil 3 Methodischer Ansatz und Mindestanforderungen zur Bewertung der Kompensationsmöglichkeiten

Unabhängig ob es sich um den Neubau eines Tunnels oder um eine Nachrüstung eines Bestandsbauwerkes handelt, werden aufgrund der äußeren Randbedingungen und wirtschaftlichen Gegebenheiten verschiedene Bauwerks- und Ausstattungsvarianten untersucht. Dabei muss eine Vielzahl von Anforderungen und Schutzzielen anhand verschiedenster Szenarien betrachtet und untereinander abgewogen werden. Abb. 45 verdeutlicht ein schematisches Verfahren zum Vergleich verschiedener Ausstattungsvarianten, welches bei der Verwendung einer BBA in Tunneln, insbesondere als Kompensationsmaßnahme (vgl. Abschnitt 2.6) zu Anwendung kommt.

Im Folgenden wird das grundsätzliche Vorgehen bei der Durchführung von exemplarischen Kompensationsmaßnahmen zur Erfüllung der in der Abbildung dargestellten Anforderungen bzw. Schutzziele aufgezeigt. Diese Anforderungen können für einen spezifischen Tunnel erweitert oder geändert werden.

3.1 Kompensationspotenzial

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit ein oder mehrere technische bzw. bauliche Systeme oder organisatorische Maßnahmen durch eine BBA ganz oder teilweise zu kompensieren.

Die Kompensation von Maßnahmen und deren Bewertung erfolgt immer in Hinblick auf die Schutzziele, für die eine ursprüngliche Maßnahme dimensioniert wurde. Als Grundprinzip gilt hier das Erreichen des gleichen Sicherheitsniveaus.

Dies soll am folgenden vereinfachten Beispiel verdeutlicht werden:

Schutzziel:

- Personen können aus einem bestimmten Bereich des Tunnels für eine Dauer von X Minuten nach Entstehung des Brandes sich selbst retten (also herrscht in diesem Bereich für einen Zeitraum von mindestens X Minuten eine überlebensfähige Atmosphäre)

Voraussetzungen:

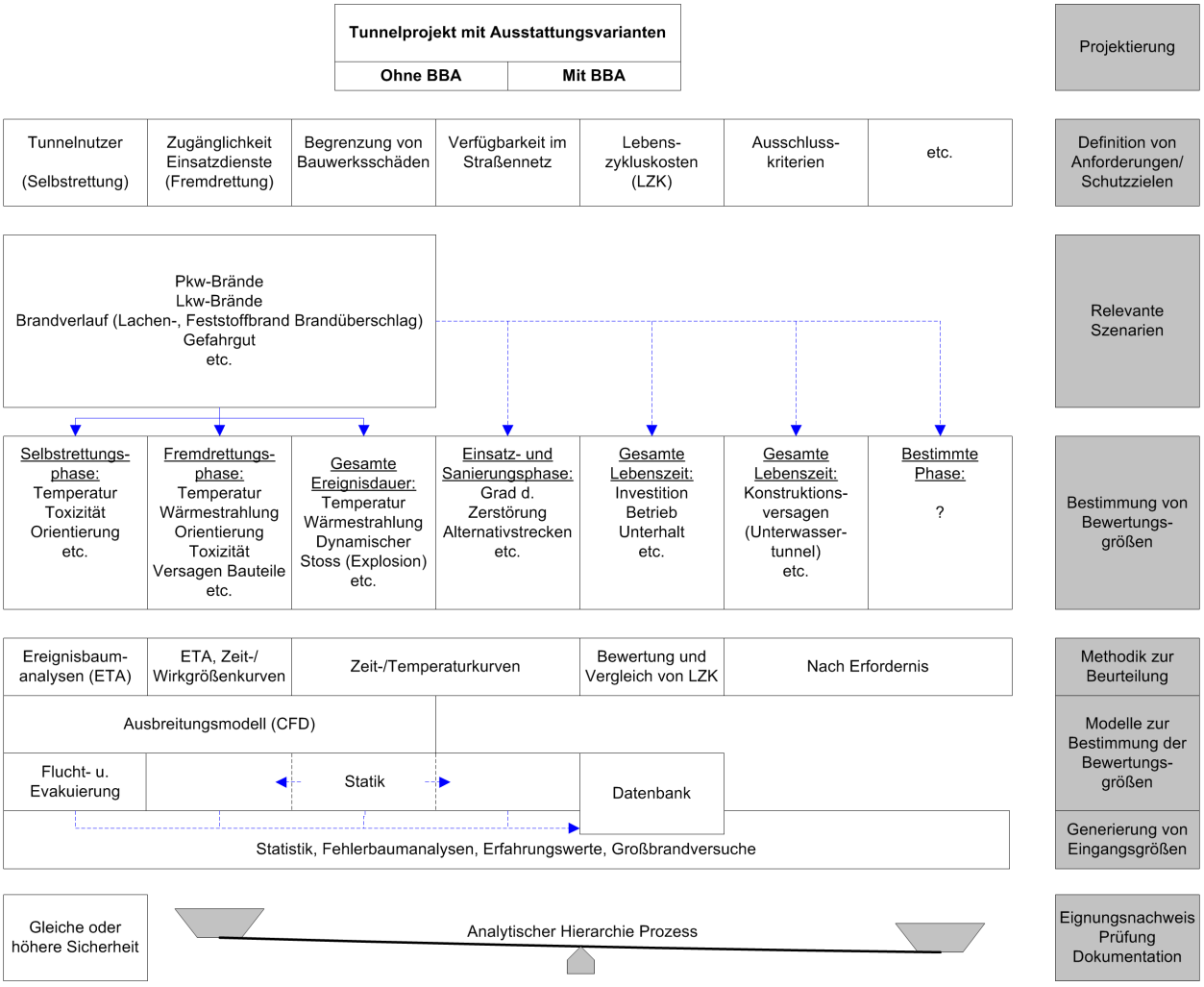


Abb. 45
Ablaufschema zum Nachweis des Kompensationspotenzials einer BBA

- Bemessungsbrand für die Lüftungsdimensionierung gemäß RABT und Risikobewertung: 100 MW, Bauliche/geometrische Voraussetzungen durch den Tunnel bestimmt (Tunnellänge, etc.)

Maßnahme nach RABT:

- Rauchgasabsaugung über eine Zwischendecke mit einer Leistungsfähigkeit von 300 m³/s zur Begrenzung der Ausbreitung und Erzeugung einer raucharmen Schicht
- Notausgänge in sichere Bereiche alle 300 m
- Fluchtwegmarkierung, Orientierungsbeleuchtung, Lautsprecherdurchsagen, etc.

Erforderliche Abweichung vom Regelwerk:

- Verzicht auf Zwischendecke und Rauchgasabsaugung, statt dessen Verwendung einer Längslüftung

Maßnahmen zur Kompensation:

- Einsatz einer BBA
- Notausgänge in sichere Bereiche alle 350 m
- Verdichtete Fluchtwegsmarkierungen/-beleuchtung zur Ermöglichung eines schnellen Auffindens der Notausgänge auch bei aktivierter BBA[30]

Die Entscheidung ob eine Kompensation von Maßnahmen sinnvoll ist, muss für den Einzelfall getroffen werden und kann neben dem Nachweis der gleichen Sicherheit unter anderem auf Basis einer Bewertung der Lebenszykluskosten (LZK), wie im Abschnitt 3.5 beschrieben, durchgeführt werden. Der Nachweis der gleichen Sicherheit von verschiedenen Ausführungsvarianten wird im Abschnitt 3.3 erläutert.

In den folgenden Kapiteln werden die grundsätzlichen Kompensationspotenziale in Bezug auf die Schutzziele kurz beschrieben. Hierbei ist hervorzuheben, dass hier eine pauschale Beschreibung erfolgt. Die Effizienz der verschiedenen Anlagentechnologien (Typ der BBA) im Hinblick auf die einzelnen Schutzziele kann erheblich abweichen und muss im Einzelfall geprüft werden. Die hier angegebenen Maßnahmen sind aus den Ergebnissen der Brandversuche im Rahmen des SOLIT² Forschungsvorhabens abgeleitet und basieren daher auf einer spezifischen BBA.

[30] Dabei ist eine Berechnung oder Simulation derzeit nicht möglich. Es handelt sich hier um empirische Erfahrungswerte.

Anschließend wird die Methodik zur Ermittlung eines qualitativen Kompensationspotenzials für die Bereiche des Nutzerschutzes, des Bauwerksschutzes und der Fremdrettung erläutert.

3.1.1 Selbstrettungsphase

Die vorherrschenden Maßnahmen zur Sicherstellung einer überlebensfähigen Atmosphäre in der Selbstrettungsphase sind die Brandfalllüftung und der Ausgang in sichere Bereiche über Fluchtwege in benachbarte Röhren oder separate Rettungsstollen. Hier können sich durch den Einsatz einer BBA erhebliche Kompensationspotenziale ergeben die auch Auswirkungen auf ein zu planendes Bauwerk haben können.

Brandfalllüftung

Bei BBA mit einer sehr großen Kühlwirkung, z. B. Wassernebelanlagen, kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Temperatur der Rauchgase und damit auch zu einer sehr deutlichen Volumenreduzierung. Hinzu kommt, dass insbesondere bei Feststoffbränden die maximale HRR deutlich begrenzt wird. Bei Flüssigkeitsbränden wird die Ausbreitung des Brandes auf benachbarte Objekte erschwert.

Folgende Möglichkeiten der Kompensation ergeben sich durch den Einsatz einer BBA:

- Die kritische Strömungsgeschwindigkeit der Längslüftung, die ein Zurückdrücken der Rauchschicht verhindern soll, kann in Abhängigkeit vom Tunnelquerschnitt reduziert werden. Es besteht die Möglichkeit, bei Neubauten die Anzahl bzw. die Leistung von Strahlventilatoren zu reduzieren bzw. bei der Nachrüstung mit der vorhandenen Ausstattung größere Bemessungsbrände abzudecken.
- Bei Einsatz einer Quer- bzw. Halbquerlüftung kann die Effizienz der Rauchgasabsaugung gesteigert werden. Damit kann bei Neubauten die Leistung der Rauchgasabsaugung reduziert werden bzw. bei der Nachrüstung mit der vorhandenen Ausstattung größere Bemessungsbrände abgedeckt werden.
- In vielen Fällen kann durch den Einsatz einer BBA eine Quer- bzw. Halbquerlüftung durch eine Längslüftung ersetzt werden. Dadurch ergeben sich erhebliche bauliche Einflüsse und Einsparmöglichkeiten für den Querschnitt des Tunnels bzw. der für die Rauchabsaugung notwendigen Bauwerke und betriebstechnischen Ausstattungen.

In Brandversuchen[31] konnte beobachtet werden, dass die Leistungsfähigkeit der Brandfalllüftung bei gleichzeitig aktivierter Wassernebel-BBA verdreifacht [32] werden kann.

Abstände von Notausgängen

Durch die verbesserten Umgebungsbedingungen beim Einsatz einer BBA während eines größeren Brandes kann möglicherweise der Abstand von Notausgängen vergrößert werden. Dies kann insbesondere dann zu erheblichen Einsparungen führen, wenn ansonsten ein separater Rettungsstollen erforderlich wäre.

Gerade beim Einsatz von BBA zur Optimierung der Selbstrettungsphase ist, ähnlich wie dies bei der Brandfalllüftung der Fall ist, eine unmittelbare Aktivierung sinnvoll. Daher ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass durch die BBA keine Gefährdung der Tunnelnutzer auftritt (z. B. durch Erstickung, Ausrutschen oder Sichtbehinderung).

Bei der Beurteilung der Sichtbarkeit sollte nicht die Situation „ohne Brand im Tunnel“ sondern der Fall „Brand ohne BBA“ als Vergleichsmaßstab herangezogen werden. Um die Orientierung in den aktivierten Bereichen der BBA zu verbessern, können einfache Maßnahmen, wie zum Beispiel Fluchtwegleitsysteme, eine sinnvolle Verbesserung darstellen.

3.1.2 Fremdrettungsphase und Brandbekämpfung

Für die Phase der Fremdrettung und Brandbekämpfung sind die im Abschnitt 2.4.3.2 beschriebenen Maßnahmen vorgesehen:

Brandfalllüftung

Für die Kompensation der Brandfalllüftung gelten die gleichen Möglichkeiten, wie sie bereits im Abschnitt 3.1.1 erläutert wurden. Jedoch bekommt dies für die Fremdrettungsphase aufgrund der Zeitspanne nach einem Brandereignis eine besondere Bedeutung. Gemäß der RABT und anderer Regelwerke liegt die Bemessungsbrandgröße für die Brandfalllüftung bei 30 MW, bei hohen LKW-Fahrleistungen bei 50–100 MW. Dies stellt nicht die maximal zu erwartende Brandgröße dar, sondern dient als Dimensionierungshilfe der Brandfalllüftung für die Selbstrettungsphase. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Hilfskräfte ist jedoch bei einem entsprechenden Szenario, z. B. LKW-Vollbrand, von einem deutlich größeren Brand auszugehen, so dass sich auch hier eine Steigerung der Effizienz der Brandfalllüftung als deutlicher Vorteil zeigt. Neben den positiven Auswirkungen der BBA auf das Arbeitsumfeld im Bereich des Brandes ist auch ein deutlich sichereres und schnelleres Vorrücken zum Brandherd möglich.

Einsatzzeiten und Standortwahl der Feuerwehr

Aufgrund der Anfahrtszeiten (z. B. bei Tunneln im ländlichen Raum) und der damit verbundenen Verfügbarkeit und Ausrüstung der umliegenden Feuerwehren steht für einige Tunnel, insbesondere für die mit einem erhöhten Gefährdungspotenzial, die Forderung im Raum, eine eigene Feuerwehr in Portalnähe zu stationieren.

Durch den Einsatz einer BBA wird die Gefahr der Ausbreitung eines Brandes deutlich reduziert. Daneben werden die Auswirkungen des Brandes im Tunnel auf Personen und das Bauwerk reduziert.

Daher steht ein deutlich vergrößertes Zeitfenster für die Rettungskräfte zur Verfügung, um Fremdrettungsmaßnahmen einzuleiten oder die Brandbekämpfungsmaßnahmen zu beginnen.

3.1.3 Bauwerksschutz

Durch den Einsatz einer BBA können Temperaturen und Wärmestrahlung begrenzt und die Expositionsdauer von Bauteilen verkürzt werden. Folglich können Maßnahmen, die dem Schutz der Bewehrung vor hohen Temperaturen dienen und damit einer Reduzierung der Standfestigkeit des Bauteils vorbeugen, angepasst werden.

Veränderte Bemessungsbrandkurve

Üblicherweise werden für die Dimensionierung von baulichen Brandschutzmaßnahmen Standard-Zeit-Temperaturkurven (vgl. Abschnitt 2.2.2.2) verwendet. Beim Einsatz einer BBA ist es möglich, dass eine veränderte Zeit-Temperaturkurve zur Anwendung kommt. Diese enthält dann die zeitabhängigen Temperaturen, die im Rahmen von Brandversuchen ermittelt worden sind. Anhand solcher projektspezifischer Temperaturkurven können Bauteile wie gewohnt dimensioniert werden. Besonders bei kritischen Tunneln (z. B. Unterwassertunneln) bietet sich i. d. R. ein hohes Einsparpotenzial.

Verzicht auf nachträgliche bauliche Brandschutzmaßnahmen

Insbesondere bei der Nachrüstung von Tunnelanlagen gemäß neuen höheren Anforderungen (modifizierte Zeit-Temperaturkurve) werden oft nachträglich aufgebrachte Brandschutzbekleidun-

[31] Siehe Anhang 2 dieses Leitfadens

[32] Ein annähernd gleicher Effekt der Brandfalllüftung (Längs- und Halbquerlüftung) wurde für Freibrände mit ca. 30 MW und Brände mit ca. 100 MW und aktivierter BBA beobachtet.

gen genutzt. Allerdings können dann die notwendigen regelmäßigen Bauwerksinspektionen nicht mehr uneingeschränkt durchgeführt werden. Analog zum obigen Abschnitt ist es auch hier beim Einsatz einer BBA möglich, dass solche Maßnahmen kompensiert werden.

3.1.4 Weitere Effekte

Zusätzlich zu den im Abschnitt 3.1.3 erläuterten Maßnahmen zur Kompensation von baulichen Maßnahmen ist davon auszugehen, dass der Schaden am Bauwerk und an den Betriebseinrichtungen im Fall eines Brandes sinkt. Dadurch können durch den Einsatz einer BBA u. a. folgende weitere positive Effekte erreicht werden:

- Die Kosten für die Reparaturmaßnahmen nach einem Brand am Bauwerk und an der Betriebseinrichtung sinken.
- Die notwendige Zeit zur Reparatur und Sanierung sinkt erheblich. Dadurch werden ggf. Verluste durch fehlende Mauteinnahmen reduziert. Aber auch bei ohne Entgelt nutzbaren Tunneln ist von erheblichen Vorteilen auszugehen, da durch die Reduzierung der Nicht-Verfügbarkeit der volkswirtschaftliche Schaden reduziert wird.

3.2 Grundsätzliches Vorgehen bei der Umsetzung von Kompensationsmaßnahmen

3.2.1 Kompensation bei Nutzerschutz (Fluchtwegabstände, Brandfalllüftung)

3.2.1.1 Grundsätzliches

Für den Schutz der Tunnelnutzer im Brandfall ist die Selbstrettungsphase mit den vorherrschenden Fluchtbedingungen in den ersten Minuten nach Brandausbruch entscheidend. Die Fluchtbedingungen werden durch eine Vielzahl von interagierenden Parametern und Wirkungen bestimmt. Zum einen sind dies Einflüsse aus dem Brandszenario selber, dass durch die Wärme- und Rauchfreisetzung gekennzeichnet ist. Zum anderen sind es technische und bauliche Randbedingungen die der Branderkennung, der Rauchgasabführung (Brandfalllüftung) oder Personenleitung (Notausgänge, Fluchtwegkennzeichnung, Lautsprecherdurchsagen) dienen. Die in den aktuellen Regelwerken verankerten Sicherheitskonzepte sehen ausschließlich Maßnahmen zur Branddetektion sowie der Rauchgas- und Personenleitung vor. Folglich war bisher für eine vergleichende Sicherheitsbetrachtung das Brandszenario selber als „unabänderliche“ Ursache zu betrachten.

Durch die Beeinflussung der Ursache Brand mit einer BBA werden die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Wirkungen erzielt. Die Reduzierung der Brandleistung sowie die Kühlung der Brandgase und der damit einhergehenden Volumenverringerung lassen die Kompensation der folgenden Ausstattungselemente zu:

- Lüftungssystem: Verzicht auf eine Zwischendecke mit Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Lüfterbauwerk, ggf. mit Abluftkamin; Ausführung einer reinen Längslüftung über Strahlventilatoren
- Reduzierung der notwendigen Längslüftungsgeschwindigkeit und damit Reduzierung der notwendigen Leistung der Brandfalllüftung
- Reduzierung der Leistung der Rauchgasabsaugung
- Bemessungsbrandleistung: Reduzierung der für die Dimensionierung erforderlichen größten Energiefreisetzungsrate; dadurch reduzierte Auslegung von Lüftern und der zugehörigen Energieversorgung
- Notausgangsabstände: Optimierung der erforderlichen Abstände bei nur aufwändig herzustellenden Notausgängen

Neben den genannten Ausstattungen sind bei der Nachrüstung von alten Tunnelanlagen mehrere fehlende Maßnahmen durch eine BBA kompensierbar.

3.2.1.2 Ermittlung und Bewertung des Kompensationspotenzials

Das Kompensationspotenzial in Bezug auf die Tunnelnutzersicherheit, das sich durch den Einsatz einer BBA ergibt, erfordert den Vergleich von unterschiedlichen Ausstattungsvarianten hinsichtlich der Selbstrettung für den betrachteten Tunnel. Die Referenz ist dabei ein nach den geltenden Richtlinien ausgestatteter Tunnel.

Szenarien

Wesentlich ist die Definition und Betrachtung von realistischen Brandszenarien, mit denen das jeweilige Sicherheitsniveau abgebildet wird. Diese Szenarien müssen zum einen die möglichen ungestörten Brandverläufe und zum anderen die Wechselwirkung zwischen technischer Einrichtung und Brandverlauf nachbilden (z. B. BBA). Wegen des hohen Aufwandes bei der Berechnung der Szenarien muss dabei ein Kompromiss zwischen einer umfassenden Berücksichtigung aller Szenarien und für den Relativvergleich zulässigen Vereinfachungen oder Reduzierungen gefunden werden.

Für eine Betrachtung von Sicherheitsausstattungen, die ausschließlich der Branderkennung, der Rauchgasabführung oder Personenleitung dienen, hat sich die Betrachtung von reinen Lachenbränden als ungünstiges „Worst-Case“-Szenario etab-

liert. Diese Betrachtung berücksichtigt jedoch nur eingeschränkt die Beeinflussbarkeit eines Feststoffbrandes in der Entstehungsphase durch eine BBA. Außerdem wird sie der Häufigkeitsverteilung zwischen Feststoffbränden und Lachenbränden nicht gerecht (s. Abschnitt 2.5.1) Daher sind bei der Betrachtung von Ausstattungen, die einen direkten Einfluss auf den Brand selber haben, weitere Szenarien zu berücksichtigen.

Bewertungsgröße, Methodik und Modelle

Die Bewertungsgrößen für den Nachweis der Nutzersicherheit sind alle zeitabhängigen personenschädigenden Wirkungen wie Temperatur, Toxizität, Orientierungsmöglichkeit, etc. Um das Schadenausmaß zu bestimmen sind entsprechende Strömungsberechnungen mit Hilfe von CFD-Modellen mit Flucht und Evakuierungsmodellen zu kombinieren. Diese sind ausführlich in Abschnitt 3.4 beschrieben. Die dort ermittelten Werte sind Eingangsgrößen für die in Abschnitt 3.3 beschriebene quantitative Sicherheitsbewertung mittels Ereignisbaumanalysen.

3.2.2 Kompensation bei Fremdrettungs- und Brandbekämpfungsmaßnahmen

3.2.2.1 Ermittlung des Kompensationspotenzials

Durch die in Abschnitt 2.4.3.2 beschrieben Effekte können die Hilfsmaßnahmen schneller und sicherer durchgeführt werden. Dadurch können die Auswirkungen des Brandes auf das Bauwerk und die Tunnelnutzer reduziert werden.

Durch die Kontrolle des Brandes (vgl. Abschnitt 2.4.2) steht zudem eine längere Zeitspanne für die Durchführung der Hilfsmaßnahmen zur Verfügung.

Die oben gennannten Effekte können bei folgenden Aspekten im Rahmen eines Hilfeleistungskonzept[33] berücksichtigt werden.

- Umgebungsbedingungen im unmittelbaren Brandbereich
- Lage, Verfügbarkeit und Ausstattung der nächstgelegenen Feuerwehr
- Lage, Ausrüstung der nächstgelegenen Schwerpunktfeuerwehr
- Zufahrtsmöglichkeiten zum jeweiligen Tunnelportal
- Unterstützende Maßnahmen (z. B. Notausgänge, Rettungsstollen) für das Vorrücken der Feuerwehr
- Verwendung von schnellen Einsatzkräften für Erstmaßnahmen

Jedoch ist stets ein Eingreifen der Einsatzkräfte zur Durchführung der Fremdrettungsmaßnahmen und der Brandbekämpfung erforderlich.

3.2.3 Kompensation von baulichen Brandschutzmaßnahmen

3.2.3.1 Ermittlung des Kompensationspotentials

Nachfolgend werden die in den Abschnitten 2.2.2.2 und 3.1.3 beschriebenen konstruktiven Maßnahmen hinsichtlich des Kompensationspotentials bei Einsatz einer BBA bewertet.

Normalbeton ohne ergänzenden Brandschutz

Durch eine mögliche Verringerung der Betondeckung ergibt sich folgendes Kompensationspotenzial:

- Reduzierung des Ausbruchsprofils und somit Einsparung der durch den größeren Ausbruchsquerschnitt entstehen Mehrkosten
- Reduzierung der Ausbaukosten, da weniger Bewehrung und Beton eingebaut wird
- In Zwischendecken kann möglicherweise die verzinkte Mattenbewehrung (N94) entfallen
- Reduzierung des Reparaturaufwands nach einem Brandereignis und Verkürzung des Betriebsausfalls

Spezieller Brandschutzbeton

Durch den Einsatz einer BBA kann möglicherweise der Faseranteil reduziert werden oder entfallen, da die Temperaturbelastung verringert wird:

- Reduzierung der Betonkosten, durch den geringeren Faseranteil
- Reduzierung der Kosten, die durch die Wiederherstellung des Brandschutzes entstehen und somit Verkürzung des Betriebsausfalls

Schutz des Normalbetons mit Brandschutzplatten oder Brandschutzputzen

Durch die zu erwartenden geringeren Temperaturen im Brandfall kann die Dicke der Brandschutzbekleidung oder die Dicke von Brandschutzputzen in Kombination mit der BBA reduziert werden oder sogar ganz auf diese zusätzlichen Maßnahmen verzichtet werden.

- Die Vergrößerung des Ausbruchsprofils für den Einbau der Brandschutzverkleidung bzw. des Brandschutzputzes und die damit verbundene Mehrkosten können reduziert werden
- Reduzierung der Kosten, die durch die Wiederherstellung des Brandschutzes entstehen und somit Verkürzung des Betriebsausfalls

[33] Die Feuerwehr- und Hilfeleistungsgesetze der Länder müssen entsprechend berücksichtigt werden.

Wenn zusätzliche brandschutztechnische Maßnahmen wie z. B. in Unterwasser-Tunneln erforderlich werden, können diese bei neu geplanten Straßentunneln möglicherweise durch den Einsatz einer BBA entfallen oder reduziert werden. Hier ist im Einzelnen zu prüfen, ob der Einsatz eine mindestens gleichwertige Lösung bietet, um die Schutzziele des Brandschutzes zu gewährleisten.

Insbesondere für Bestandstunnel, in denen zusätzliche Brandschutzmaßnahmen erforderlich werden, bietet eine BBA durch einen möglichen nachträglichen Einbau eine Alternative zur Verwendung von Brandschutzverkleidungen oder Brandschutzputzen.

3.2.3.2 Methodische Durchführung

Die Dimensionierung des baulichen Brandschutzes erfolgt normalerweise durch einen statischen Nachweis unter Berücksichtigung einer akzeptierten Zeit-Temperaturkurve.

Durch den Einsatz einer BBA kann eine modifizierte Zeit-Temperaturkurve angewendet werden, die aus einem Brandversuch im Maßstab 1:1 resultiert. Es ist zu prüfen ob diese neue Bemessungsbrandkurve mit einem Sicherheitsaufschlag zu versehen ist.

Neben einer Reduzierung der maximalen Temperatur kann berücksichtigt werden, dass der „Einflussbereich“ des Brandes auf das Bauwerk durch die Einkapselung des Brandes auf einen kleinen Bereich unmittelbar über dem Brandherd reduziert wird. Bereits in geringem Abstand vom Brandherd werden an den Wänden und der Decke in Strömungsrichtung keine kritischen Temperaturen mehr erreicht und eine Schädigung des Bauwerks vermieden.

3.2.4 Weitere Kompensationsmöglichkeiten und zusätzlicher Nutzen

3.2.4.1 Minimierung des Schadens im Brandfall

Eine hohe und andauernde Temperatureinwirkung auf das Bauwerk im Brandfall kann zu Abplatzungen am Beton und in der Folge wegen der starken Erhitzung zu einem Verlust der Tragfähigkeit der tragenden Bewehrung führen. Zudem können Personen im Tunnel (z. B. Rettungskräfte) durch abplatzende Betonteile gefährdet werden. Dies ist auch für den Fall anzunehmen, dass bauliche Brandschutzmaßnahmen im Tunnel durchgeführt wurden, da diese regelmäßig nur für einen definierten Zeitraum (z. B. 90 Minuten) Schutz bieten und in jedem Fall nach einem Brandfall in den Temperatur beaufschlagten Bereichen erneuert werden müssen.

Die Abplatzgefahr steigt mit zunehmender Erwärmungsgeschwindigkeit. Um Abplatzungen zu vermeiden, sollte an einer ungeschützten Betonoberfläche der Temperaturanstieg in den ersten 10 Minuten nach Brandbeginn im Mittel 70 K/min nicht überschreiten [HAA 2008].

Bei einem Temperaturanstieg von 200 K/min hingegen können bereits nach 1,5 Minuten erste Abplatzungen auftreten [DEH 2007]. Mit fortschreitendem Brandverlauf werden die Abplatzungen größer und führen dazu, dass die tragende Bewehrung freigelegt werden kann. Dadurch kann die Tragfähigkeit des Bauwerks beeinträchtigt werden. Dies ist insbesondere in kritischen Tunneln (z. B. Unterwassertunnel) aufgrund des zu erwartenden hohen Schadensausmaßes zu vermeiden.

Durch den Einsatz einer BBA können höhere Temperaturen, die über einen längeren Zeitraum auftreten, vermieden werden. Damit liegen die Instandsetzungskosten nach einem Brand erheblich niedriger, unabhängig davon, ob bauliche Brandschutzmaßnahmen vorhanden waren oder nicht. Der zu berücksichtigende Nutzen einer Kompensationsmaßnahme entspricht vor diesem Hintergrund der Reduktion von Kosten durch die Anwendung der Maßnahme (BBA).

3.2.4.2 Verfügbarkeit im Straßennetz

Betriebsunterbrechungen oder Ausfallzeiten können in Abhängigkeit von der Art des Bauwerks und seiner Verortung im infrastrukturellen Netz zu erheblichen Schäden führen. In diesem Sinne ist Schaden nicht als Reaktion des Bauwerks auf eine Differenz von Widerstand zu Einwirkung zu verstehen, sondern als finanzielle Aufwendung, welche direkt oder indirekt zu berücksichtigen ist. Als direkte Kosten entstehen auf Betreiberseite beispielsweise monetäre Verluste, in Folge des Ausbleibens von Maut- oder Transit-Gebühren. Als indirekte Kosten materialisieren sich Aufwendungen der Gesamtgesellschaft, beispielsweise in Form von Mehrreisezeiten der Verkehrsteilnehmer, einer Erhöhung der CO_2-Emissionen, regionaler Effekte und Auswirkungen auf die Wirtschaft in Folge verschlechterter Rahmenbedingungen etc.

Natürlicherweise korrelieren derartig ermittelte Aufwendungen mit dem Schädigungsgrad des Bauwerks im Brandfall: Ein höherer Schaden führt zumeist zu einem höheren Instandsetzungsbedarf am Bauwerk, welcher wiederum mit einem erhöhten Zeitbedarf für die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks einhergeht. Generell gilt dabei, dass die Auswirkungen eines Brandereignisses in hohem Maße bauwerksspezifisch sind und nicht verallgemeinert dargestellt werden können. Gleichwohl sind sie für einen

ganzheitlichen Ansatz, vor allem im Hinblick auf die Betrachtung der Lebenszykluskosten des Bauwerks, von hohem Belang. Dies gilt insbesondere im Falle von privatwirtschaftlich betriebenen Bauwerken.

Der zu berücksichtigende Nutzen einer Kompensationsmaßnahme entspricht vor diesem Hintergrund der ebenfalls Reduktion von Kosten – direkt wie indirekt – durch die Anwendung der Maßnahme (BBA).

3.2.4.3 Reduzierung der LZK

Auch wenn eine technische Maßnahme durch eine alternative Maßnahme ersetzt wird, kann es unter Umständen möglich sein, dass in einer Gesamtbetrachtung die LZK reduziert werden können. Dies ist besonders dann der Fall, wenn technisch sehr aufwendige und wartungsintensive Systeme durch Alternativen ersetzt werden.

3.3 Nachweis der gleichen Sicherheitsniveaus von Ausstattungsvarianten

3.3.1 Grundsätzliches

Vorgaben zu quantitativen Angaben zum Sicherheitsniveau eines Tunnels, die nach entsprechenden Vorgaben anerkannter Regelwerke ermittelt wurden, sind nicht näher definiert. Hingegen werden qualitative Ansprüche an die spezifizierten Maßnahmen gestellt, welche „… zu einer nach einheitlichen Grundsätzen und Kriterien entworfenen Ausstattung in Straßentunneln führen und einen sicheren Betrieb mit einer den jeweiligen verkehrlichen und örtlichen Verhältnissen angemessenen Qualität unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Die Elemente der technischen Ausstattung müssen robust, sicher und wartungsfreundlich ausgebildet und installiert werden“ [RAB 2006].

Bei Abweichungen von den Sicherheitsanforderungen entsprechend der europäischen Richtlinie 2004/54/EG bzw. den RABT oder den jeweils anderen geltenden Regelwerken darf das in den Richtlinien beschriebene Sicherheitsniveau nicht unterschritten werden. Der Nachweis hierzu ist mit anerkannten Methoden zur Sicherheitsbewertung, wie im Abschnitt 2.7 beschrieben, zu erbringen.

Die Integration einer BBA darf keine Erhöhung des Restrisikos bewirken und muss daher in einer ganzheitlichen Systembetrachtung der Tunnelsicherheit bewertet werden.

Als Referenzniveau wird im Folgenden beispielhaft ein nach RABT ausgestatteter Straßentunnel herangezogen. Bei einem solchen Verkehrstunnel wird von der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ausgegangen, wenngleich auch dort stets ein Restrisiko verbleibt. Dieses, bei vollständiger Einhaltung der RABT für einen bestimmten Tunnel erreichtes Sicherheitsniveau wird im Weiteren als Bemessungssicherheitsniveau[34] bezeichnet und stellt die Referenz für abweichend geplante bzw. ausgestattete Tunnel dar.

Basisauslegung nach RABT

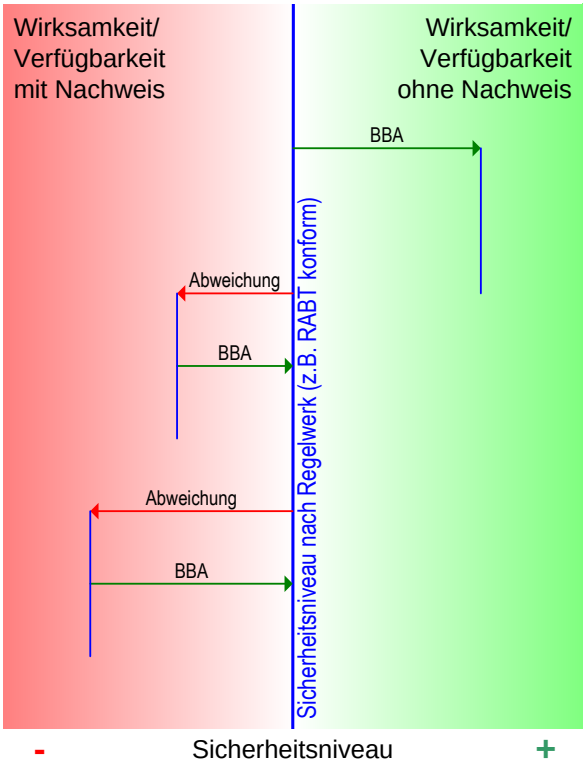


Abb. 46
Gleichwertige Sicherheit durch verschiedene Maßnahmen und Kompensation am Beispiel einer BBA

Da die anzuwendende Methode aber nur den grundsätzlichen Lösungsweg beschreibt, kann auch ein anderes Referenzniveau, zum Beispiel aus anderen Vorschriften, herangezogen werden.

Vergleich der Wirksamkeit

Werden gemäß den RABT geforderte sicherheitsrelevante Charakteristiken oder Ausstattungen von Tunneln nicht eingehalten, so wird dadurch primär das Risiko erhöht. Diese Risikoerhöhung muss durch kompensierende Maßnahmen ausgeglichen werden. Wie bereits vorausgehend beschrieben, kann beispielsweise die Implementierung einer BBA diese Kompensation ermöglichen.

Abb. 46 zeigt die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen dem vergleichbaren Sicherheitsniveau (blaue Linie) und der aus Abweichungen gegen-

[34] In anderen Fällen kann man von Risikoakzeptanzwert und Risikoakzeptanzgrenze sprechen.

über der RABT resultierenden Verminderung des Sicherheitsniveaus[35] (rote Pfeile) sowie die Wirkung einer BBA zusätzlich zu dem geforderten Sicherheitsniveau (grüne Pfeile). Die BBA kann dabei entweder als Kompensationsmaßnahme für Abweichungen angerechnet werden, oder auch als Zusatzmaßnahme im Sinne einer Übererfüllung der Anforderungen dienen.

Wird die BBA zusätzlich zu einem regelkonform ausgeführten Tunnel implementiert, so muss deren Wirksamkeit und Verfügbarkeit in Bezug auf das Erreichen bestimmter Schutzziele nicht notwendigerweise nachgewiesen werden.

3.3.2 Bewertung der Sicherheit von Ausstattungsvarianten

Die Bewertung der Sicherheit erfordert Verfahren und Methoden, mit denen die Wirkungen von einzelnen Maßnahmen, also zum Beispiel die der Brandfalllüftung oder BBA, auf das Sicherheitsniveau abgebildet werden können. Quantitative Risikoanalysen ermöglichen dabei eine detaillierte Betrachtung verschiedenster Einflussgrößen. Die hierzu erforderliche Methodik ist z. B. im Verfahren zur „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ beschrieben [BAS 2009]. Als Maß für die Sicherheit dient hierbei das Risiko, das sich aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen ergibt.

$$R = \sum_{i=1}^{n} H_{ei} \cdot A_{ei}$$

H_{ei}: Häufigkeit des Endzustandes i
A_{ei}: Schadensausmaß des Endzustandes

Für das Schadensausmaß sind ggf. modifizierte Werte aus Kompensationsmaßnahmen zulässig.

3.3.3 Ermittlung von Eintrittshäufigkeiten

Die Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten für die Endzustände erfolgt mit Hilfe von Ereignisbäumen (Event Trees), indem ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Initialereignis) die Wirksamkeit von spezifizierten Sicherheitsfunktionen bis zum Erreichen eines Endzustands abgefragt und in einem logischen Modell kombiniert werden. Bei jeder Abfrage der Systemantworten ist zu unterscheiden, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Versagen oder ein Erfolg vorliegt. So entstehen bis zum Endzustand unterschiedliche Zweige im Ereignisablauf. Jedem einzelnen Ereignisablauf kann ein Schadenausmaß über Berechnungen zugeordnet werden. Eine Summation über die Risikobeiträge (Häufigkeit x Schadenausmaß) der Einzelzweige ergibt dann das mit dem auslösenden Ereignis verbundene Gesamtrisiko. Der prinzipielle Aufbau eines Ereignisbaums ist in Abb. 47 schematisch dargestellt.

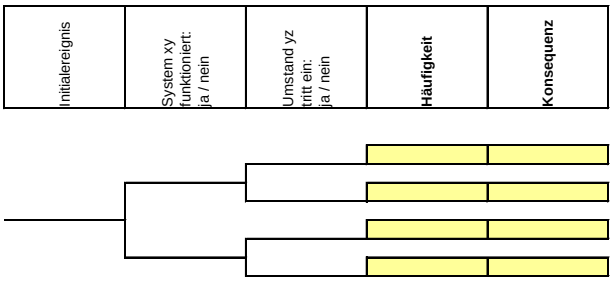


Abb. 47
Beispiel für einen Ereignisbaum

Bei der Entwicklung eines Ereignisbaums sollten die Ereignisse in zeitlicher Abfolge aufgeführt werden. Hierbei werden nur die Systemantworten dargestellt, die eine unmittelbare Wirkung auf die Ablaufentwicklung der Ereignisse haben. Die Verfügbarkeit der mittelbar benutzten Subsysteme, wie zum Beispiel der Energieversorgung, ist nicht Bestandteil der Ablaufentwicklung, sondern wird implizit in den zugehörigen Verzweigungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

Die Häufigkeiten der Endzustände ergeben sich dann durch Verknüpfung der Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses mit den Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf und werden wie folgt berechnet:

$$H_{ei} = H_0 \prod P_i$$

H_{ei}: Eintrittshäufigkeit des Endzustandes i
H_0: Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses
P_i: Verzweigungswahrscheinlichkeit im Ereignisablauf

Diese Berechnung ist nur möglich, wenn die Eintrittshäufigkeit des auslösenden Ereignisses und die Verzweigungswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemantworten bekannt sind. Folgende Verzweigungspunkte können im Ereignisablauf vorkommen:

[35] Entspricht der Erhöhung des Restrisikos

Verzweigungen	*Verzweigungsbedingungen*
Fahrzeugtypabhängige Brandleistung	PKW 5 MW / LKW 30 MW / LKW 100 MW
Zeitraum	Tag / Nacht
Verkehrszustand	Frei / Stau
Detektion erfolgreich	Ja /nein
Tunnelsperrung erfolgreich	Ja /nein
Alarmierung Verkehrsteilnehmer	Ja /nein
Brandnotlüftung aktiviert	Ja /nein
BBA aktiviert	Ja /nein
Erhöhtes Ausmaß	Ja /nein
Fremdrettung / Brandbekämpfung	Ja /nein

Abb. 48
Beispiele für Verzweigungen im Ereignisablauf

Die zugehörigen Verzweigungswahrscheinlichkeiten sind entweder durch Statistiken bekannt, werden durch Expertenbefragung ermittelt oder müssen mit Hilfe von Fehlerbaumanalysen bestimmt werden.

Die Fehlerbaumanalyse ist eine sogenannte Top-Down-Methode, in der ausgehend von einem Top-Event (Verzweigungspunkt) das unerwünschte Ereignis durch logische Verknüpfungen von Unterereignissen beschrieben wird, welche die Ursachen für das Top-Event bilden. Die Unterereignisse ihrerseits werden wiederum durch logische Verknüpfungen auf weitere Unterereignisse zurückgeführt, bis die Ebene der Basisereignisse erreicht ist.

Auf der Ebene der Basisereignisse besitzen die Ereignisse keine funktionelle Abhängigkeit mehr. Die Fehlerbaumanalyse führt somit das definierte unerwünschte Ereignis durch logische Verknüpfungen auf Basisereignisse zurück, deren zu erwartende Häufigkeit man kennt oder abschätzen kann. Abb. 49 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Fehlerbaums, der aus drei Basisereignissen besteht.

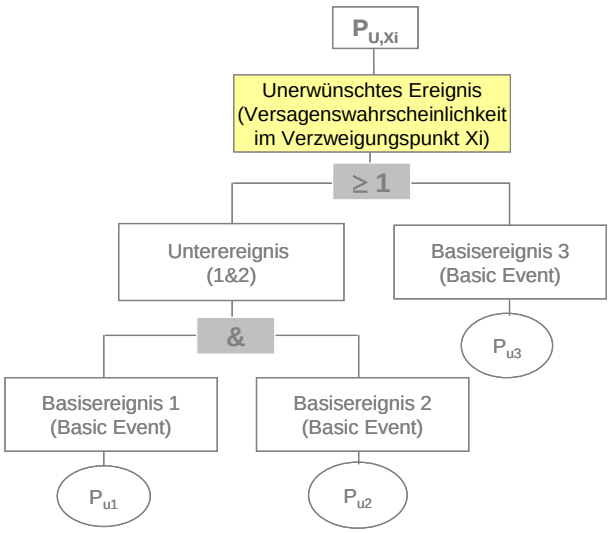


Abb. 49:
Beispiel eines Fehlerbaums

Die logischen Wechselbeziehungen zwischen den Unterereignissen werden mittels logischer UND-/ODER-Verknüpfungen berücksichtigt. Das unerwünschte Ereignis tritt in diesem Beispiel ein, wenn das Unterereignis (1 & 2) oder das Basisereignis 3 eintreten (ODER-Verknüpfung). Damit das Unterereignis (1 & 2) eintritt, müssen gleichzeitig die Basisereignisse 1 und 2 eintreten (UND-Verknüpfung).

Von der untersten Ebene, die die Basisereignisse enthält, wird sukzessiv aufsteigend jede Verknüpfung bis zum unerwünschten Ereignis berechnet.

Die Wahrscheinlichkeit für die Nichtverfügbarkeit eines Sicherheitssystems ist dem unerwünschten Ereignis P_u gleichzusetzen, wobei P_{ui} die Nichtverfügbarkeit der einzelnen Systemkomponenten ist.

Damit ein Ereignis aus einer UND-Verknüpfung eintritt, müssen alle Unterzustände i eintreten. Dieses ist zum Beispiel für die Darstellung von redundanten Sicherheitssystemen wichtig, bei denen alle Subsysteme versagen müssen.

$$\text{UND-Verknüpfung}: P_u = \prod_{i=1}^{n} P_{u,i}$$

Ein Ereignis einer ODER-Verknüpfung tritt ein, wenn mindestens einer der Unterzustände i eintritt. Bei Systemen, die mehrere Ursachen für ein Versagen haben, kommt zum Beispiel diese logische Verknüpfung zum Einsatz.

$$\text{ODER-Verknüpfung}: P_u = 1 - \prod_{i=1}^{n} \left(1 - P_{u,i}\right)$$

3.3.4 Ermittlung des Schadenausmaß

Die Ermittlung von Schadensausmaßen erfordert zum einen die Bestimmung der einwirkenden Größen und zum anderen die daraus für Nutzer und das Bauwerk resultierenden Auswirkungen. Beide Größen sind maßgeblich vom jeweiligen Initialereignis abhängig.

Verwendung von Daten aus Brandversuchen

Die beste Möglichkeit, Einwirkungen durch Brände, insbesondere bei Aktivierung einer BBA, abzubilden, sind Ergebnisse aus Brandversuchen. Sind diese in geeigneter Form ermittelt worden (vgl. Abschnitt 3.6.2), sollten diese anwendet werden.

Verwendung von CFD-Modellen

Sofern die Eingangsparameter und die verwendeten Rechenmodelle von CFD-Simulationen mit Daten aus realen Brandversuchen validiert wurden, lassen sich diese für eine Anpassung von Versuchsdaten an reale Tunnelbauwerke oder veränderte Umgebungsbedingungen verwenden. Dann können auch Einwirkungen eines Brandes ermittelt werden, ohne dass für jeden einzelnen Tunnel Brandversuche gemacht werden.

Weiterhin lassen sich durch CFD-Simulationen bei oben genannten Voraussetzungen Einwirkgrößen auf zum Beispiel Nutzer und Bauwerk genauer Abbilden, als dies mit messtechnischer Erfassung bei Brandversuchen möglich ist. Dabei muss aber immer berücksichtigt werden, dass eine Simulationen nur eine beispielhafte Darstellung mit begrenzter Genauigkeit liefert. Die Qualität der Eingangsdaten und der verwendeten Rechenmodelle sind dabei von entscheidender Bedeutung.

Abb. 50 und Abb. 51 zeigen beispielhaft die mittels eines CFD-Codes berechneten Temperatureinwirkungen infolge eines 30 MW Brandes in einem Richtungsverkehrstunnel bei freiem Verkehr.

Zur Bestimmung der nutzerseitigen Auswirkungen sind mehrere sich überlagernde Effekte zu berücksichtigen. Neben den äußeren Einwirkungen (z. B. Temperatur oder Gaskonzentrationen) auf den einzelnen menschlichen Organismus ist das Gesamtschadensausmaß von der Anzahl der potentiell betroffenen Personen im betrachteten Abschnitt abhängig. Beides sind hoch dynamische Vorgänge zwischen denen gegenseitige Abhängigkeiten bei sich ändernden Randbedingungen bestehen. So sind die Einwirkungen infolge Druck, Rauch und Temperatur auch von der Aktivierung und Wirkung technischer Einrichtungen abhängig. Die Anzahl der betroffenen Personen wiederum ist abhängig von der verkehrlichen Situation, dem Zeitpunkt der Detektion eines Ereignisses und der möglichen Sperrung eines Tunnels sowie den momentanen Fluchtbedingungen im Tunnel.

Ähnliches gilt auch für die Auswirkungen auf das Bauwerk. Hier ist insbesondere die Höhe der Temperaturen und die Stärke der Wärmestrahlung sowie die Dauer deren Einwirkung auf einen bestimmten Bereich zu berücksichtigen. Dieser weicht zum Beispiel für die Fälle mit und ohne Aktivierung einer BBA erheblich voneinander ab.

3.3.5 Risikoermittlung

Zur Darstellung der Risiken werden die über die Ereignisbäume ermittelten Häufigkeiten der Endzustände und das jeweils zugehörige Schadensausmaß nach der Größe des Ausmaßes sortiert und als Summenhäufigkeiten in Häufigkeitsausmaßdiagrammen (H-A-Diagrammen) aufgetragen. Dadurch lassen sich ermittelte Risiken in vergleichbarer Form darstellen. Abb. 52 zeigt beispielhaft den Verlauf von Risiken in der Form von getöteten Tunnelnutzern in Abhängigkeit von Maßnahmen. Dies lässt sich auch für andere Risiken, z. B. Bauwerksschäden, analog darstellen.

3.3.6 Risikobewertung

Die Bewertung der Risiken kann bei einer nicht a priori definierten Akzeptanzschwelle nur über relative Vergleiche erfolgen. Als Vergleichsmaßstab dient hierzu üblicherweise ein nach den RABT ausgestatteter Tunnel. Eine Maßnahme wird dann als sicherheitserhöhend bewertet, wenn durch sie geringere Risiken erzielbar sind.

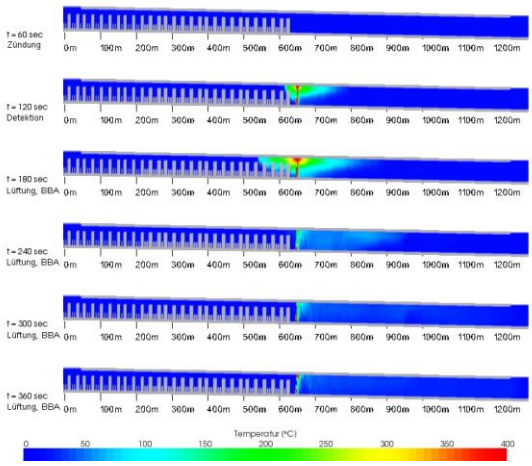


Abb. 50:
Temperatureinwirkungen infolge eines 30 MW Brandes in einem Richtungsverkehrstunnel bei freiem Verkehr mit BBA

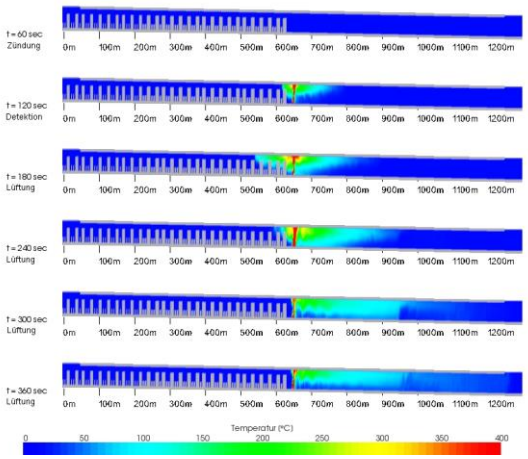


Abb. 51:
Temperatureinwirkung infolge eines 30 MW Brandes in einem Richtungsverkehrstunnel bei freiem Verkehr ohne BBA

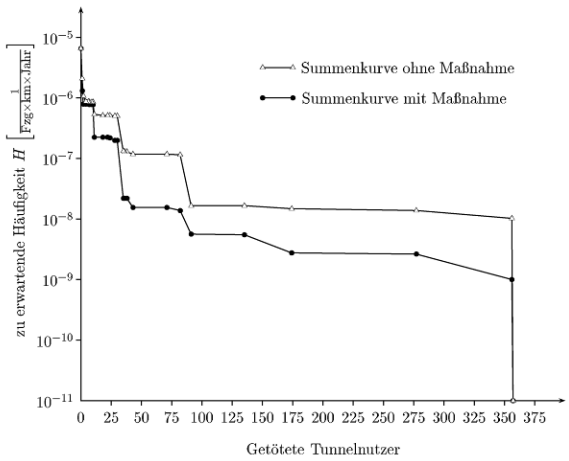


Abb. 52:
Beispiel eines H-A-Diagramms zur Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen in Abhängigkeit von getöteten Tunnelnutzern.

3.4 Simulationsmodelle zur Verwendung in Nachweisverfahren

Zwischen Tunnelnutzern, Bauwerk und sicherheitstechnischen Anlagen und Einrichtungen bestehen komplexe Wechselbeziehungen. So hat die Tunnelgeometrie (Querschnitt, Längsneigung) Einfluss auf die Ausbreitung von Rauch und Temperatur. Die Rauch- und Temperaturausbreitung wird aber auch durch Lüftungssysteme bzw. eine BBA beeinflusst. Dies wirkt sich wiederum auf die Nutzer, das Bauwerk sowie die Wirksamkeit von weiteren Sicherheitseinrichtungen (Beleuchtung, Fluchtwegkennzeichen, Notausgänge etc.) aus. Zur Berücksichtigung dieser Wechselbeziehungen bei der Quantifizierung von Schadensausmaßen und der Ermittlung von Maßnahmenwirksamkeiten werden räumlich und zeitlich hochauflösende Rechenmodelle zur

- Strömungs- und Ausbreitungssimulation,
- Flucht- und Evakuierungssimulation,
- Verkehrsflusssimulation

verwendet. Die Anforderungen an die jeweiligen Simulationsmodelle werden nachfolgend kurz beschrieben.

3.4.1 Strömungs- und Ausbreitungsmodelle

Zur detaillierten Ermittlung der maßgeblichen Einwirkgrößen sind raum- und zeitdiskrete Aussagen zu Druck-, Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen erforderlich. Eine Darstellung von Sichtweiten ist aufgrund der Komplexität des menschlichen Sehvermögens nur in einem äußerst begrenzten Maß möglich.

Des Weiteren müssen Vorgänge der Energie- und Wärmeübertragung sowie mehrere Phasen (fest, flüssig, gasförmig) und chemische Reaktionen abgebildet werden können.

Grundlage zur Beschreibung dieser Größen und Vorgänge bilden die kontinuierlich formulierten, zeitabhängigen Differentialgleichungen zur Massenerhaltung, Impulserhaltung, Energieerhaltung und Stofferhaltung, deren Lösung aufgrund ihrer Komplexität nur mit numerischen Verfahren möglich ist.

Die realitätsnahe Abbildung der Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge erfordert die Lösung der Gleichungen

- für den instationären Fall,
- im 3-dimensionalen Raum,
- für kompressible Strömungen.

Ferner müssen Mehrkomponenten- und Mehrphasenströmungen (flüssig, gasförmig) abgebildet werden können und durch weitere Sub-Modelle die Berechnung von

- Turbulenzen (LES, kε-Modell),
- Bränden (Feststoffbrände, Flüssigkeitsbrände, Gasbrände),
- Wärmeübertragung,
- Phasenübergänge und
- chemischen Reaktionen

möglich sein.

Mit Hilfe der Modelle müssen ferner beliebige Ventilationsbedingungen durch Ventilatoren und meteorologische Einflüsse sowie Effekte der BBA abbildbar sein.

Als Ergebnis der numerischen Berechnungen müssen kontinuierlich Ausgaben vorliegen zu:

- Energiefreisetzung
- Temperaturen und Wärmestrahlung
- Strömungsgeschwindigkeiten und Verteilung
- Gaskonzentrationen.

Unabhängig von der Art des verwendeten Simulationsmodells ist es unabdingbar, dass eine Validierung der Rechenergebnisse anhand eines echten Brandversuchs sowohl für den Fall mit als auch für den Fall ohne Aktivierung einer BBA durchgeführt wird. Dafür bieten sich die in Abschnitt 2.5.4 dargestellten Szenarien in einem Versuchstunnel an. Erst wenn die Eingangsparameter und Rechenmodelle eine ausreichende Übereinstimmung zwischen dem Brandversuch im Versuchstunnel und der Simulation bieten, können diese für Inter- bzw. Extrapolationen sowie für weitere Abschätzungen der Effekte von Ventilationssystemen, BBA und anderen den Brand beeinflussenden Sicherheitssystemen verwendet werden.

Insbesondere bei der Verwendung der Eingangsdaten der BBA ist zu beachten, dass die Ergebnisse der Simulation nur jeweils für den in den Brandversuchen verwendeten Typ anwendbar sind.

3.4.2 Flucht- und Evakuierungsmodelle

Modelle zur Flucht und Evakuierungsermittlung dienen dazu, in Abhängigkeit unterschiedlicher Sicherheitseinrichtungen wie Brandfalllüftung, Notausgänge, BBA, Leiteinrichtungen, Kommunikationseinrichtungen etc. sowie unter Berücksichtigung der Einwirkungen auf den menschlichen Organismus Selbstrettungsbereiche bzw. einzelpersonenbezogen Schadensausmaße abzuleiten.

3.4.2.1 Wirkungsmodelle

Mit Hilfe von Wirkungsmodellen lassen sich in Abhängigkeit der Einwirkgrößen Luftdruck, Temperatur, Wärmestrahlung und jeweiliger Schadstoffkonzentration personenbezogen Letalitäten[36] ermitteln.

Temperatureinwirkung

Die infolge eines Brandes freigesetzte Energie kann auf den Menschen durch Wärmestrahlung oder infolge konvektiver Wärmeübertragung schädigend wirken. Effekte durch Wärmestrahlung beschränken sich in der Regel auf den unmittelbaren Brandbereich[37], während durch konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche, bis zu mehrere hundert Metern, transportiert werden kann. Die damit verbundene Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Verbrennungen oder Wärmestaubildung im menschlichen Organismus führen. Abb. 53 zeigt die zu erwartenden Letalitäten infolge Temperatureinwirkung (konvektiver Anteil). Wichtig ist dabei, dass hier die Höhe der Temperatur und die Expositionszeit eine Rolle spielen.

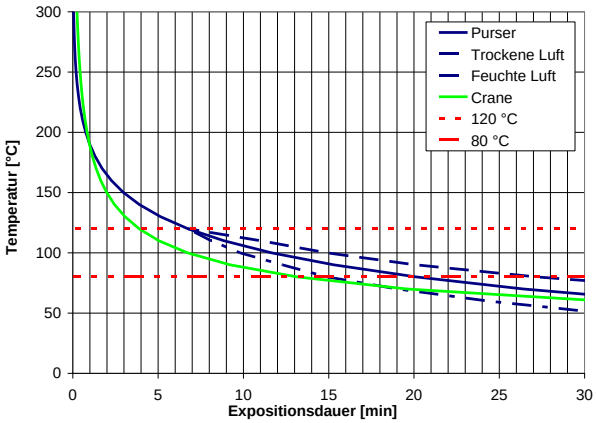


Abb. 53:
Letalitäten infolge Temperatureinwirkung [BAS 2009]

Für die Beurteilung der Wirkung von Temperaturen auf Einsatzkräfte muss zusätzlich die Wärmestrahlung berücksichtig werden. Auch hier sind Höhe und Einwirkdauer zu berücksichtigen.

Einfluss von toxischen und erstickenden Rauchgasbestandteilen

Von der Vielzahl der im Brandrauch enthaltenen toxischen Rauchgaskomponenten wirken im Wesentlichen Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) akut toxisch auf den Menschen. Beide Gase wirken bereits in geringen Konzentrationen narkotisch und führen bei längerer Expositionsdauer oder bei höheren Konzentrationen sehr rasch zum Tod.

Die Bestimmung von Letalitäten infolge von Rauchgasen kann auf Basis von Probit-Funktionen[38] erfolgen. Mit Hilfe des Integrals zur Dosis und der Probit Variable Y lassen sich die Grenzkonzentrationen in Abhängigkeit der Expositionsdauer und der zu erwartenden Letalitäten bestimmen.

$$Dosis = \int_{t_0}^{t_{ende}} C^n \, dt$$

C: Konzentration [ppm]
t: Expositionszeit [s]

Berechnung der Probit-Variable Y:

$$Y = k1 + k2 \ln(Dosis)$$

mit : $Y_{99} = 8$
$Y_{50} = 5$

Für die Berechnung der Probit-Variablen können die in der Abb. 54 beispielhaft aufgeführten Konstanten verwenden. Weitere finden sich in der Fachliteratur.

Stoffbezeichnung	***K1***	***K2***	***N***
Kohlenmonoxid (CO)	-37,98	3,70	1,00
Blausäure (HCN)	-9,80	1,00	2,40

Abb. 54:
Beispielhafte Probit Konstanten

Aus den genannten Formeln lassen sich Grenzkurven für Letalitäten in Folge einer Exposition durch CO bzw. HCN errechnen.

[36] Letalität: Tödlichkeit eines Giftstoffes

[37] Hier ist von wenigen Metern, im Fall von Großbränden bis zu 100 m auszugehen.

[38] Probit-Funktionen: Mittels des aus der Statistik bekannten Probitmodells berechnete funktionale Zusammenhänge zwischen Schadstoffkonzentrationen und Einwirkdauer in Abhängigkeit zu erwartender Letalitäten.

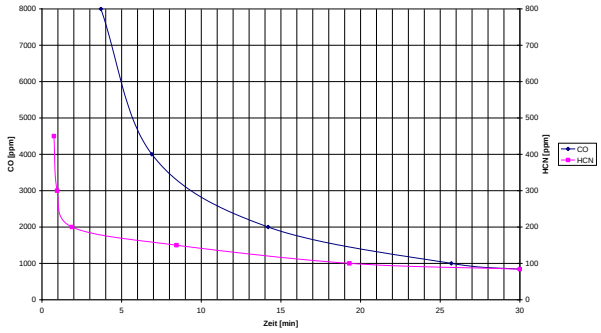


Abb. 55
Letalitäten infolge CO bzw. HCN Exposition [BAS 2009]

Sichtbedingungen infolge Raucheinwirkung

Das Durchführen einer erfolgreichen Selbstrettung wird maßgeblich durch die Orientierungsfähigkeit beeinflusst. In Untersuchungen [BAS 2009] konnte gezeigt werden, dass die Fluchtgeschwindigkeit direkt abhängig ist von der vorhandenen Sichtweite. Wie aus Abb. 56 ersichtlich, ist ab einer Sichtweite von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeiten zu rechnen. Ab ca. 5 m Sichtweite ist keine zielgerichtete Fortbewegung mehr möglich. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Untersuchungen nur für den Fall des freien Brandes durchgeführt wurden.

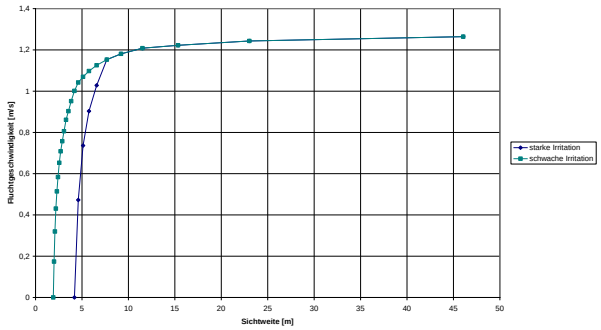


Abb. 56:
Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte [BAS 2009]

Insbesondere bei der Verwendung von BBA kommt der Orientierungsfähigkeit eine besondere Bedeutung zu. In Versuchen mit Probanden im Rahmen des Projektes SOLIT² hat sich gezeigt, dass eine Orientierung im aktivierten unverrauchten Bereich einer Wassernebel BBA gut möglich ist, sofern eine ausreichende Markierung der Fluchtwege und eine ausreichende Beleuchtung, wie z. B. nach den RABT gefordert, vorhanden sind.

3.4.2.2 Bestimmung von Selbstrettungsbereichen

Ein Beispiel für die Bestimmung von Selbstrettungsbereichen über Weg-Zeit-Linien zeigt Abb. 57 in Abhängigkeit der Sichtbedingungen für einen Notausgangsabstand von 150 m. Darin ergeben sich Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung (grüne Bereiche) aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung zurückgelegt werden

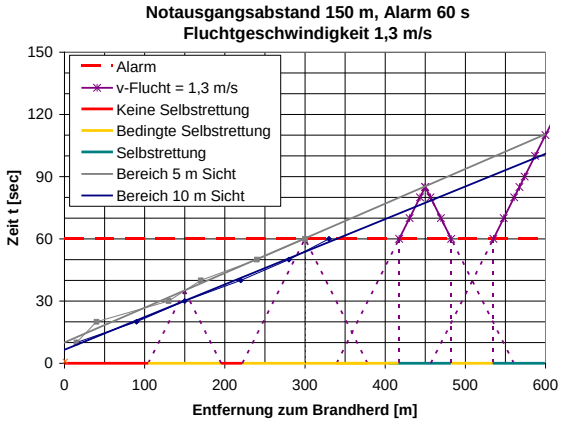


Abb. 57:
Selbstrettungsbereiche [BAS 2009]

kann. Die Bereiche, aus denen sich Tunnelnutzer retten können, wenn sie bereits vor Alarmierung durch die betriebstechnischen Einrichtungen selbstständig mit der Flucht beginnen, werden als Bereiche mit bedingter Selbstrettung (gelbe Bereiche) bezeichnet. Keine Selbstrettung (rote Bereiche) ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr erreicht werden kann. Für die weiteren Einwirkungen infolge Temperatur und Gaskonzentrationen erfolgt die Überprüfung analog.

3.4.2.3 Verkehrsflussmodelle

Sind für die Zwecke der Risikoanalyse Abschätzungen aus statistischen Verkehrsdaten und / oder Annahmen nicht ausreichend, so können ergänzend Modelle zur Beschreibung des Verkehrsflusses zum Einsatz kommen, um über den Fahrzeugbesetzungsgrad für unterschiedliche Verkehrszustände die Anzahl potenziell betroffener Personen bestimmen zu können. Hierzu müssen Einzelfahrzeuge in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen und Verkehrszusammensetzung abbildbar sein.

3.5 Verwendung multikriterieller Entscheidungssysteme zum Vergleich von Ausstattungsvarianten auf Basis von Lebenszykluskosten

3.5.1 Allgemeines

Mit Hilfe multikriterieller Entscheidungsverfahren (Multiple Attribute Decision Making, MADM) besteht die Möglichkeit, Entscheidungen intuitiv (personenbezogenes Ergebnis) oder analytisch (zu Hilfenahme von mathematischen Methoden und Kennzahlen) zu treffen. Wichtig dabei ist, dass der Entscheider eine Vielzahl von Informationen sammelt, ordnet und bewertet. Je nach Art des Problems kann mit beiden Methoden die vermeintlich beste Entscheidung getroffen werden.

Ein wichtiges Element, um die einzelnen Attribute bzw. Kriterien untereinander vergleichen zu können, ist das zu verwendende Messverfahren. Gerade bei qualitativen Kriterien ist die Benutzung einer einheitlichen Skala dabei von großer Bedeutung. Es stehen im Allgemeinen drei verschiedene Skalentypen zur Verfügung: eine Nominalskala (Skala, bei der alternative Ausprägungen nur deren Verschiedenheit zum Ausdruck bringen; z. B. Merkmal: Verfahrenstyp), eine Ordinalskala (Möglichkeit der Reihung verschiedener Messgrößen; z. B. Merkmal: Qualitätsbenotungen) sowie eine Kardinalskala (metrisches Messniveau; die Ausprägungen dieses Skalenniveaus lassen sich quantitativ mittels Zahlen darstellen; z. B. Lärmpegel).

Die Kardinalskala stellt im Allgemeinen die Skala dar, die am vielfältigsten einsetzbar ist. Sie ermöglicht alle mathematischen Operationen, so dass eindeutige Berechnungen durchführbar sind. Zudem erlaubt sie es, Aussagen über das Verhältnis der Daten zueinander zu treffen, wie etwa „Alternative A ist fünfmal besser als Alternative B“. Aufgrund der breit gefächerten Anwendbarkeit dieser Skala, stellt sie die Grundlage für viele MADM-Verfahren dar.

Hier wird für die weitere Betrachtung der Analytische Hierarchie Prozess (AHP) empfohlen. Der AHP eignet sich sehr, wenn es um die Strukturierung komplexer Entscheidungsprobleme geht. Das Verfahren arbeitet auf der Basis entscheidungsrelevanter Alternativen und Ziele und berücksichtigt sowohl qualitative als auch quantitative Daten. Für den praktikablen Einsatz verfügt das Verfahren darüber hinaus über eine relativ einfache Struktur. Der AHP weist dabei Merkmale wie eine einfache Anwendung, die Nutzung für Einzelpersonen und Gruppen, die Förderung von Kompromiss und Konsens, und die Kommunikation und Transparenz von Ergebnissen auf.

3.5.2 Der Analytische Hierarchie Prozess (AHP)

Der AHP ist durch drei Hauptbestandteile gekennzeichnet: analytisches Vorgehen, hierarchische Struktur und eine prozessuale Vorgehensweise. Die analytische Vorgehensweise bedeutet, dass die Methode mit mathematisch-logischen Funktionen arbeitet, welche für Projektbeteiligte auch ohne Expertenwissen durchaus verständlich sind. Die hierarchische Struktur führt zu einem Ergebnis, das das Entscheidungsproblem in mehrere Ebenen unterteilt (inklusive aller wichtigen Kriterien und Alternativen). Der prozessuale Charakter erlaubt darüber hinaus, dass die Methode mehrmals neu gestartet werden kann, um beispielsweise Entscheidungen erneut zu prüfen, oder um den gesamten Entscheidungsprozess zu beschreiben. Darüber hinaus ist es möglich, im Zuge der Entscheidung quantitative und qualitative Informationen zu nutzen.

Für ein aussagekräftiges Ergebnis müssen verschiedene Informationen gewichtet werden, um die Bedeutung der gemachten Entscheidung zu unterstreichen. Aus diesem Grund wird für eine qualitative Bewertung eine 9-Punkte-Skala eingeführt, die Paar- und Alternativvergleiche erlaubt [THE 2011].

Die vertiefte Betrachtung des AHP im Zusammenhang mit unterirdischer Infrastruktur ist nicht Gegenstand des Leitfadens. In diesem Zusammenhang wird beispielshaft auf [THE 2011] und [THW 2011] verwiesen.

3.5.3 Erarbeitung von Bewertungskriterien

In diesem Abschnitt werden Bewertungskriterien für die Wahl einer Ausstattungsvariante für Tunnelbetriebstechnik erläutert, um eine ganzheitliche Bewertung bezüglich aller möglichen Parameter vornehmen zu können. Die Hauptkriterien Ökonomie, Verfügbarkeit sowie Nutzerrisiko, die in der 1. Ebene stehen, werden beschrieben und weiter in Subkriterien der 2. und 3. Ebene unterteilt.

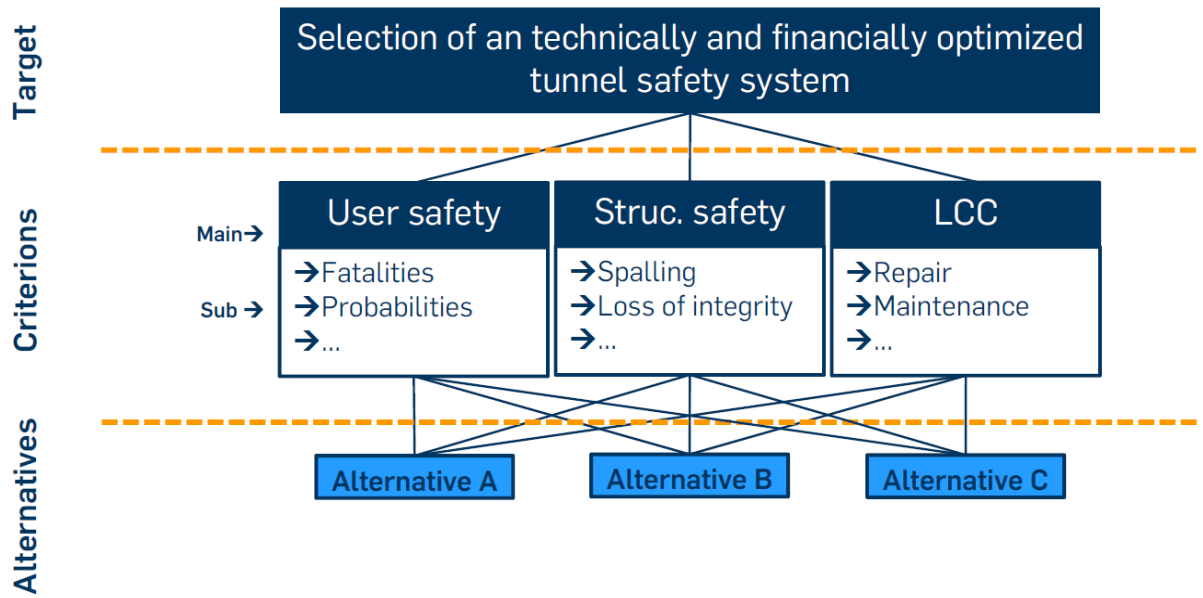


Abb. 58
Struktureller Aufbau der Entscheidungssituation

3.5.3.1 Allgemeines

Die Wahl einer Tunnelbetriebstechnik weist Charakteristika auf, die in einer Planungsphase durch die Projektbeteiligten zunächst zusammengetragen werden müssen. Infolge der großen Heterogenität bei Randbedingungen und Einflussfaktoren, sich je nach Projekt und seinem Umfeld unterscheidend, entstehen meta-komplexe Entscheidungssysteme ohne Allgemeingültigkeit, die eine Entscheidung im Einzelfall notwendig machen.

Um die identifizierten Kriterien der AHP-Methodik anzupassen, ist es weiterhin wichtig, Kriterien in Haupt- und Subkriterien zu gliedern.

3.5.3.2 Lebenszykluskosten

Lebenszykluskosten (LZK) ergeben sich aus der Gesamtsumme aller Kosten von Beginn bis zum Abriss der Tunnelbetriebstechnik. Weiterführende Erörterungen finden sich in Abschnitt 2.8.

3.5.3.3 Bauwerkssicherheit

Ein Brand in einem Tunnel kann im Extremfall zu temporärem oder dauerhaftem Verlust des Bauwerks, mit z. T. erheblichen Auswirkungen auf das es umgebende infrastrukturelle Netz, führen. Ein solcher Bauwerksschaden mündet daher unter Umständen in hohen gesamtgesellschaftlichen Folgekosten, sowohl in Form direkter (Bauwerksinstandsetzung oder -ersatz) als auch indirekter Kosten (bspw. Mehrreisezeiten auf Ausweichrouten). Aus diesem Grund ist bei der Wahl einer betriebstechnischen Komponente auch ihr Einfluss auf die Bauwerksverfügbarkeit zu prüfen und im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung in die Bewertung mit einzubeziehen.

Die hinzuzuziehenden Subkriterien differieren unter Umständen in Abhängigkeit vom definierten strukturellen Schutzziel (bspw. Temperatur der Bewehrungslage, Abplatzungsneigung). Die Subkriterien können dabei entweder quantitativ, bspw. durch numerische Untersuchungen, oder qualitativ, durch Experteneinschätzung auf Basis eines aktuellen Kenntnisstandes, formuliert werden.

3.5.3.4 Nutzerrisiko

Im Rahmen typischer quantitativer Risikoanalysen werden für das spezifische Bauwerk die jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie das korrespondierende Schadensausmaß für einzelne Szenarien bestimmt. Das hierbei ermittelte Nutzerrisiko stellt einen deutlichen Gradmesser für die Wirksamkeit einer spezifischen betriebstechnischen Maßnahme dar, speziell im Vergleich zu einem herkömmlich ausgestatteten Tunnel.

3.5.4 Sensitivitätsanalyse

Nachdem das Gesamtergebnis des Entscheidungsproblems ermittelt wurde und die Gewichte für die verschiedenen Varianten zu Verfügung stehen, kann eine abschließende Analyse der gewählten Parameter und Gewichtungen Aufschluss über die Sensitivität des Entscheidungsproblems liefern. Dringend empfohlen wird eine solche Analyse im Fall von zwei oder mehr Alternativen mit nahezu gleichen Gewichtungen. Hauptziel dieser Analyse ist es, den Einfluss von potentieller Änderung der Gewichtung einzelner Kriterien aufzuzeigen, welche beispielsweise aus einer Priorisierung verschiedener Parameter resultieren können. So ist es denkbar, dass in der Diskussion über die Effizienz einer Kompensationsmaßnahme das Kos-

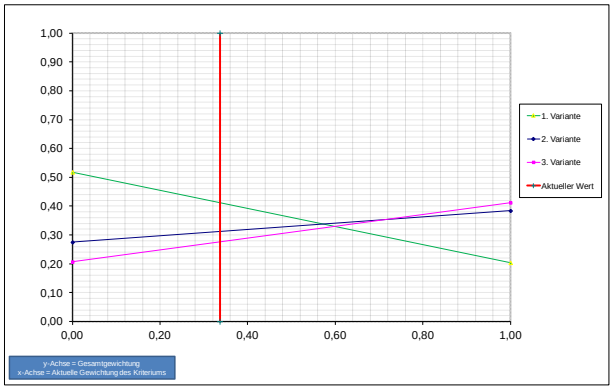


Abb. 59
Struktureller Aufbau der Entscheidungssituation

tenkriterium im Vergleich zu Bauwerksrisiko und Nutzerrisiko überrepräsentiert ist. Durch die Applikation einer Sensitivitätsanalyse ist nachweisbar, ob sich die Rangfolge verschiedener Maßnahmen, beispielsweise bei Vergleich des Einsatzes einer BBA mit reduzierter Lüftung im Vergleich zu einer herkömmlichen Ausstattungskonfiguration gemäß RABT, durch eine Veränderung der Gewichtung des Kriteriums Kosten verändert. Die gleiche Möglichkeit besteht nach [THE 2011] und [THW 2011] auch für alle anderen Kriterien. In Abb. 59 ist dies Anhand eines fiktiven Beispiels dargestellt.

In diesem Beispiel konkurrieren drei Ausstattungsvarianten miteinander, Variante 1 (grün), 2 (blau) und 3 (pink). Für den konkreten Einsatzbereich könnten diese Varianten exemplarisch drei Ausstattungskonfigurationen repräsentieren, beispielsweise eine Variante mit BBA und kompensierter Betriebstechnik, eine Variante mit herkömmlicher Ausstattung und eine dritte Variante mit herkömmlicher Ausstattung plus BBA. Im dargestellten Fall ist eine Entscheidungshierarchie gemäß der in Abschnitt 3.5 dargestellten Situation aufgebaut worden. Alle drei Hauptkriterien (Kosten, Bauwerk und Nutzer) sind paritätisch priorisiert (rote Kurve bei 33,33% Gewicht an der Gesamtentscheidung). Unter diesen Voraussetzungen liegt Variante 1 im Vergleich zu den anderen deutlich auf Rang 1, mit einem Gesamtgewicht von etwa 0,4. Würde in diesem Fall die Bedeutung des Kriteriums Kosten über einen Wert von 60% hinaus erhöht, also die rote Gerade entlang der x-Achse hin zum Wert 0,6 verschoben, so fände eine deutlich erkennbare Rangumkehr statt, sodass Variante 1 plötzlich den letzten Rang in der Reihenfolge bekleiden würde.

Eine solche Analyse ist mit dem AHP-Algorithmus für alle Hauptkriterien möglich. Der Entscheider analysiert dabei einzelne Kriterien insofern, dass die Gewichtung minimal in kleinen Schritten verändert wird. Dadurch wird klar, ab welcher Gewichtung es zu Rangwechseln kommt. Wenn nur minimale Gewichtsveränderungen ausreichen, um einen Rangwechsel hervorzurufen, so kann von einem instabilen Ergebnis gesprochen werden. In solchen Fällen sollte die getroffene Entscheidung überprüft und erneut durchgeführt werden.

Vorteil einer geführten Entscheidung, so wie mit Hilfe des AHP realisierbar, ist zum einen die Transparenz der getroffenen Entscheidung: Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse kann die Stabilität bzw. Instabilität eines Ergebnisses durch prozentuale Änderung der Gewichtung der Kriterien gemessen werden. Darüber hinaus ist die Entscheidung transparent, nachvollziehbar und kann vor allem Hinsichtlich der Priorisierung unter objektivierten Gesichtspunkten durchgeführt werden.

3.6 Mindestanforderungen an ortsfeste BBA in Tunneln

3.6.1 Auswahl der Anlagentechnologie

Bei der Auswahl der entsprechenden Anlagentechnologie der BBA sind insbesondere die folgenden Faktoren zu berücksichtigen:

- Eignung der BBA zur Erfüllung der definierten Schutzziele
- Keine Gefährdung für Personen im Tunnel oder für Einsatzkräfte
- Verfügbarkeit der Einzelkomponenten und der Anlage als Gesamtsystem
- Auswirkungen der BBA auf die weitere Betriebsausstattung oder notwendige bauliche Maßnahmen

Der Auswahl sollte eine detaillierte Analyse durch eine kompetente und geeignete Stelle vorangehen, bei der neben der grundsätzlichen Eignung auch die Eignung für den spezifischen Tunnel geprüft wird.

In jedem Fall ist der Nachweis der Wirksamkeit anhand von Brandversuchen, wie im Abschnitt 3.6.2 erläutert, zu erbringen. Eine Übersicht über die grundsätzlichen Wirkbereiche zweier verschiedener Anlagentechnologien gibt Abb. 60.

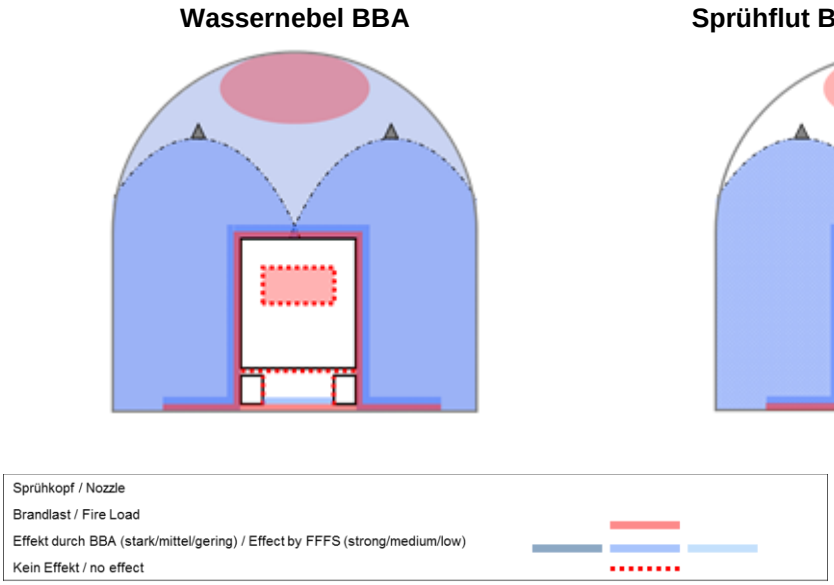


Abb. 60
Schematische Darstellung der Wirkbereiche verschiedener BBA Systemtechnologien

Die hier aufgeführten Erläuterungen sind als pauschale und vereinfachte Beschreibungen im Rahmen einer Einführung zu dieser Thematik zu verstehen. Auf die Darstellung von besonderen Untergruppen von Arten von BBA wurde bewusst verzichtet, um eine exemplarische Darstellung zu ermöglichen. Konkrete Systemtypen und -arten können in der Realität von den hier gemachten Beschreibungen abweichen. Eine Zuordnung und Bewertung von BBA hat daher stets auf Basis konkreter Versuchsdaten und Anlagenparametern zu erfolgen.

Die folgende Tabelle gibt eine exemplarische Übersicht über wesentliche Eigenschaften zweier verschiedener Anlagentechnologien. Sie kann als Methodik beim Vergleich von BBA verschiedener Typen für einen spezifischen Tunnel herangezogen werden. Zur alternativen Anlagentechnologie „Schaum-BBA“ siehe Teil 1 (Vorbemerkungen), insbesondere Abschnitt 1.2, sowie Teil 2 (Grundlagen), Abschnitt 2.4.1.

Übersicht Systemeigenschaften[39]		Wassernebel (ohne Additive)	Sprühflut + offene Sprinkler (ohne Additive)
Wirkbereich	Decke (Gasraum)	teilweise	nein
	Gasraum unter den Düsen	ja	ja
	Fahrbahn (Offen)	ja	ja
	Fahrbahn (Verdeckt)	nein	nein
	Verdeckte Bereiche[40]	nein	nein
Kühlung Rauchgase (siehe Kapitel 2.4.1)		sehr gut	gut
Kühlung Brandlast		gut	sehr gut
Kühlung Bauwerksoberfläche		ja	teilweise
Brandbekämpfung	Klasse A offen	direkt	direkt
	Klasse A verdeckt	nur Auswirkungen	nur Auswirkungen
	Klasse B offen	direkt	direkt (mit Einschränkung[41])
	Klasse B verdeckt	nur Auswirkungen	nur Auswirkungen
	Gasbrände	ja	nein
	Eignung für alternative Energien	teilweise	teilweise
Absorption Wärmestrahlung		sehr gut	gut
Erstickungsgefahr		nein	nein
Sichtbehinderung (ohne Berücksichtigung des Rauchs)		gering	sehr gering
Korrosivität Löschmittel		nein	nein
Reizungen (z. B. Haut und Augen)		nein	nein
Rutschgefahr		nein	nein
Verdeckung des Bodens/Hindernisse		nein	nein
Verdecken von Sicherheitshinweisen[42]		nein	nein
Kontamination der Infrastruktur / Wasser[43]		nein	nein
Spülen der BBA nach Auslösung[44]		nein	nein
Vorwarnzeit vor Aktivierung erforderlich		nein	nein
Komplexität		gering	gering
Rohrverbindungen		Standard	Standard
Material Rohrleitungen		Edelstahl	Edelstahl
Bewegliche Teile in der Ausbringvorrichtung		nein	nein
Daten aus Realbrandversuchen für Tunnel erforderlich		ja	ja
Reinigungsaufwand nach Aktivierung		gering	gering
Eigenkühlung der Anlage im Brandfall[45]		sehr gut	sehr gut

[39] Die nachstehenden Einträge basieren auf Versuchen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, auf Versuchsergebnisse aus anderen Forschungsvorhaben und sonstigen Projekten wie z.B. SOLIT1 und UPTUN, auf Berichten, die in der Fachliteratur verfügbar sind sowie auf Überlegungen und Erfahrungen der Konsortiumsmitglieder.

[40] z.B. im Fahrzeuginneren, Fahrzeugunterseite, Bremsen, verdeckte Teile der Reifen, Laderaum

[41] der Inertisierungseffekt ist beschränkt

[42] z.B. Sicherheitsdokumentation und Warntafeln an LKW nach ADR und Fluchtwegkennzeichnungen

[43] Bei Test- und Fehlauslösungen

[44] Bei Test- und Fehlauslösungen

[45] Kühlung der Bauteile wie insbesondere Rohrleitungen durch das Löschmedium im Inneren

3.6.2 Nachweis der Wirksamkeit Der Nachweis der Effektivität von BBA für Tunnel, muss unabhängig von der verwendeten Anlagentechnologie, grundsätzlich anhand von Brandversuchen im Maßstab 1:1 erfolgen. Derzeit ist noch keine ausreichende Datenbasis für eine der üblicherweise verwendeten Anlagentypen (vgl. Abschnitt 2.4) vorhanden, um pauschal gültige Kriterien, wie zum Beispiel die Wasserbeaufschlagungsrate (mm/m² oder l/m³/min), festlegen zu können. Eine ausführliche Beschreibung von Brandversuchen zum Nachweis der Wirksamkeit findet sich im Anhang 7

Liegt für eine spezifische BBA ein Wirksamkeitsnachweis mit einer ausreichenden Datenbasis vor, sind Inter- bzw. Extrapolationen und damit eine Übertragung auf reale Tunnel möglich. Ein Nachweis mittels Brandversuch für jeden einzelnen Tunnel ist damit nicht erforderlich. Empfohlene Grenzen für eine Übertragbarkeit werden im Folgenden erläutert.

Bei der Durchführung ist Folgendes grundsätzlich zu beachten:

Auswahl des Szenarios

Die Auswahl der Brandszenarien für die Überprüfung der Effektivität sollte auf einem risikobasierten Ansatz basieren, d. h. die Szenarien sollten das vorhandene Risiko wiederspiegeln und einen ungünstigen Fall abdecken. Die Prüfszenarien sollten realitätsnah und reproduzierbar sein, z. B. wird von einer Verwendung echter LKW abgeraten. Eine Empfehlung für Brandszenarien findet sich in Abschnitt 2.5.4.

Versuchstunnel

Brandversuche werden üblicherweise in speziellen Versuchsanlagen durchgeführt. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit sind der Auswahl hier enge Grenzen gesetzt. Der Versuchstunnel sollte eine Länge von mindestens 400 m besitzen und der Querschnitt dem eines typischen Tunnels entsprechen.

- Mindestlänge: 400 m
- Mindesthöhe: 5,0 m
- Mindestbreite: 7,0 m

BBA

Üblicherweise werden für die Durchführung von Brandversuchen Versuchsanlagen oder Prototypen von BBA verwendet. Dennoch müssen einige grundlegenden Parameter identisch zu einer später realen Installation sein:

- Der genaue Typ der Düse bzw. des Sprühkopfes mit dokumentierter Tropfenverteilung und K-Faktor ist zu verwenden.
- Die Brandversuche sollten mit der geringsten Beaufschlagungsrate und mit dem geringsten Druck der späteren Installation durchgeführt werden. Die Differenz dieser Parameter innerhalb der Versuchsanlage sollte weniger als 10% betragen.
- Der Abstand zwischen der Düse bzw. Sprühköpfen und der Brandlast (LKW-Brandlast) sollte in der realen Umsetzung nicht mehr als 20% größer als in der Versuchsinstallation sein.
- In den Versuchen sind maximale Abstände zwischen den Düsen bzw. Sprühköpfen zu wählen.

Aktivierung der BBA und Laufzeit der Versuche

Die Aktivierung der BBA ist gemäß den in der Realität zu erwartenden Bedingungen anzustreben. Dementsprechend sind für das gewählte Szenario in Verbindung mit der Zündquelle Zeiten[46] bis zur Aktivierung der BBA zu ermitteln, die marktübliche Systeme für eine sichere Erkennung und Lokalisierung üblicher Weise benötigen.

Ventilationsbedingungen

Die Art der Ventilation und die Strömungsgeschwindigkeit sollten grundsätzlich denen entsprechen, die auch bei Aktivierung der BBA im realen Tunnel zu erwarten sind. Die Versuchsdurchführung unter Bedingungen des „normalen“ fließenden Verkehrs ist nicht sinnvoll. Vielmehr müssen, insbesondere wenn eine BBA als Kompensationsmaßnahme für die Brandfalllüftung dienen soll, die Versuche unter Brandfallbedingungen durchgeführt werden und die BBA und Lüftung aufeinander abgestimmt werden. Die üblicherweise verwendete Längsströmungsgeschwindigkeit bei Längslüftung liegt dann bei ca. 2–3 m/s.

Der Einfluss der Längsströmung im Tunnel auf das Löschmedium der BBA muss überprüft werden. Dabei ist die Sprühablenkung mindestens bei 1 m/s, 3 m/s und 5 m/s zu bestimmen.

Kriterien

Die Effizienz einer BBA sollte im Rahmen einer schutzzielorientierten Bewertung erfolgen. Für die einzelnen Bewertungskriterien sind Sollwerte gemäß den zu erfüllenden Schutzzielen mit genauer örtlicher Definition, Zeitpunkt und Dauer festzulegen. So ist es zum Beispiel wenig sinnvoll, Kriterien für das Schutzziel „Möglichkeit zur Selbstrettung“ in unmittelbarer Umgebung des

[46] Diese Zeit ist in der Regel deutlich länger als die z.B. in RABT geforderten 60 s für einen offenen Flüssigkeitsbrand mit einer Größe von 5 MW.

Brandes nach 20 Minuten festzulegen. Für wesentliche Schutzziele ist eine Dosis, also das Produkt aus Einwirkungsmenge (Temperatur, Gaskonzentration etc.) je Zeiteinheit und Einwirkungsdauer, anzugeben.

Dokumentation

Der Dokumentation der Versuche kommt insbesondere in einem Nachweisverfahren für BBA als Kompensationsmaßnahme große Bedeutung zu. Dazu gehört beispielsweise der Versuchsaufbau vor und dessen Zustandsfeststellung nach dem Brandversuch, die Konfiguration der BBA und die weiteren Rahmenbedingungen. Mindestens folgende Werte sind messtechnisch alle 2 s während der gesamten Versuchsdauer zu erfassen:

- Temperaturen neben und über der Brandlast an 10 verschiedenen Stellen
- Temperaturen in Abständen von 10 m, 20 m, 40 m und 100 m[47] an jeweils 5 Messstellen im Tunnelquerschnitt
- Wärmestrahlung in Abständen von 5 m und 10 m, ggf. auch im direkten Brandumfeld
- Strömungsgeschwindigkeiten über den gesamten Tunnelquerschnitt im Abstand von mindestens 20 m vor und hinter der Brandlast
- Messwerte zur Abschätzung der HHR nach der Sauerstoffverbrauchsmethode
- Druck und Durchfluss der BBA
- Gaskonzentrationen in 3 verschiedenen Positionen in einem Abstand von 40 m vom Brandherd

Diese Auflistung ist keinesfalls abschließend und muss ggf. um relevante Messstellen ergänzt werden, die zur Überprüfung von Schutzzielen erforderlich sind. Zusätzlich sind Foto-, Video- und IR-Aufnahmen von jedem Brandversuch anzufertigen.

Eine detaillierte Beschreibung und Empfehlungen für die messtechnische Erfassung finden sich im Anhang 7.

Durchführung

Die Durchführung soll durch ein mit Brandversuchen dieser Art und Größe vertrautem Prüfinstitut erfolgen. Dabei sollten mindestens 3 Versuchsserien für BBA in Tunneln durchgeführt worden sein. Eine Akkreditierung als Prüfinstitut gemäß ISO/IEC 17025 wird empfohlen. Bei entsprechenden Nachweisen zu vorhandener Erfahrung und Kompetenz kann darauf verzichtet werden.

[47] Die Abstandsangaben verstehen sich in beide Richtungen und es wird von der Mitte der Brandlast ausgegangen.

3.6.3 Technische Ausführung

Die gesamte BBA muss technisch so ausgestaltet sein, dass sie den hohen Anforderungen der Tunnelumgebung dauerhaft widersteht, um im Falle einer Aktivierung zuverlässig zu arbeiten. Eine detailliertere Beschreibung der technischen Ausführung der BBA und der Anforderungen an die einzelnen Komponenten ist im Anhang 3: „Planungsleitfaden für Brandbekämpfungsanlagen in Tunneln“ zu finden).

3.6.4 Integration

Die Steuerung der BBA muss entweder als Teil des (bestehenden) Steuerungssystems des gesamten Tunnels ausgeführt werden oder so integriert sein, dass eine bidirektionale Kommunikation zwischen beiden Systemen stattfinden kann. Das Detektions- und Lokalisierungssystem sollte entweder in die übergeordnete Gesamtsteuerung oder die der BBA integriert sein und mit der jeweils anderen Steuerung kommunizieren können.

Die Steuerung der BBA sollte eine Benutzeroberfläche z. B. in Form eines SCADA-Systems (Supervisory Control and Data Acquisition) aufweisen, welches dem Tunnelbetreiber und evtl. der Feuerwehr eine Statusübersicht und eine Steuerung der Anlage erlauben.

Eine detailliertere Beschreibung der Anforderungen an die Schnittstellen zwischen der BBA und der weiteren Tunneltechnik ist im Anhang 3 zu finden.

3.6.5 Anforderungen an RAMS von Ausrüstungsgegenständen des Tunnelsicherheitssystems

Derzeit gibt es noch keine quantitativen Anforderungen an die Zuverlässigkeit, die Verfügbarkeit, die Wartbarkeit und die Sicherheit (engl. Reliability, Availability, Maintainability, Safety; RAMS) von Ausrüstungsgegenständen in Tunneln. Grundsätzlich gilt auch hier, dass der gleiche Maßstab diesbezüglich bei als Kompensationsmaßnahme dienenden Systemen herangezogen werden, der auch für das zu ersetzende System gilt. Dennoch ist es erstrebenswert, dass in Zukunft mit relevanten technischen Sicherheitseinrichtungen und insbesondere die Steuerung geeignete RAMS-Betrachtungen durchgeführt werden.

Das Entwicklungsziel der RAMS-Parameter soll im Rahmen der Produktentwicklung des Tunnelsicherheitssystems sicherstellen, dass die Ausfallwahrscheinlichkeiten der eingesetzten Komponenten unter den zu erwartenden Betriebsbedingungen, ein mindestens gleiches Maß an Zu-

verlässig erreicht wie z. B. Lüftungsanlagen und andere sicherheitsrelevante Betriebstechnik.

Die Berechnung der Zuverlässigkeitskennwerte (Ausfallwahrscheinlichkeiten) der Einzelkomponenten hat mittels aktuellen Normenstand (MIL HdBK „Military Handbook“, IEC TR 62380, NPRD 95 etc.) zu erfolgen. Felddatenauswertungen von vergleichbaren Applikationen sollten, falls vorhanden, Vorrang haben, da diese eine größere Aussagekraft besitzen.

Der Schweregrad von Einzelausfällen ist mit Hilfe einer FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) auf Systemebene zu betrachten. Kritische Ausfälle, welche einen nicht diagnostizierbaren Verlust oder eine Nichtverfügbarkeit des Sicherheitssystems zu Folge haben, sind näher zu betrachten und durch Wartungsanweisungen oder Designanpassungen zu kompensieren.

3.7 Anforderungen an die Dokumentation, Überprüfung und Begutachtung

Die in diesem Leitfaden verwendeten Methoden sind durch eine unabhängige dritte Stelle zu begutachten und zu überprüfen. Diese Institution muss eine ausreichend große Erfahrung und Fachkompetenz an realen Tunnelprojekten mit der Anwendung und Überprüfung der einzelnen Methoden haben. Das abschließende Gutachten kann sich an dem Sicherheitsgutachten gemäß der Richtlinie 2004/54/EG Anhang II orientieren.

Kommen Komponenten oder Bauteile zum Einsatz, sind geeignete Nachweise für die Eignung zum Einsatz in Tunneln zu erbringen. Dies ist von einer unabhängigen dritten Stelle zu überprüfen.

Alle Verfahren und Methoden sind in einer Weise zu dokumentieren, dass diese auch für Dritte nachvollziehbar und nachprüfbar sind. Es wird empfohlen die Dokumentation als Teil der Sicherheitsdokumentation des Tunnels, wie in der Richtlinie 2004/54/EG beschrieben, zu integrieren.

Teil 4 Quellenverzeichnis

4.1 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.

4.2 Literatur

Die hier aufgeführten Quellen können im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten über den Projektkoordinator angefordert werden, sofern diese öffentlich zugänglich sind und nicht einer Vertraulichkeit unterliegen.

[ADR 2011] Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, 1. Januar 2011

[BAL 2009] Baltzer, Imhof, Mayer, Riepe, Zimmermann, Zulauf; Forschungsbericht zu FE 03.0437/2007/FRB und FE 86.0050/2008 Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007; 2009 digital veröffentlicht auf www.bast.de

[BAS 2010] Statistisches Bundesamt, Gefahrguttransporte 2008 - Auszug aus Wirtschaft und Statistik 9/2010

[BAS 2009] Baltzer, W. et. al. „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“, Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft 66, 2009

[BMV 2005] 5. Lagebild Gefahrgut, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; Bundesamt für Güterverkehr, Juli 2005

[CEN 14972] CEN/TS 14972: Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen – Feinsprüh Löschanlagen – Planung und Einbau

[DEH 2007] Dehn, F. et al., „Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln“, MFPA Leipzig, Schlussbericht Forschungsvorhaben FE 15.448/2007/ERB, BASt- Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007

[DUF 1999] Duffè, P. “Report of the task force for technical investigation of the 24. March 1999 fire in the Mont Blanc Road Tunnel”,1999

[FIR 2003] Fire Protection Handbook. 19. Ausgabe. NFPA. 2003. Kapitel 17.

[FOG 2012] Fogtec Newsletter 02/2012, Fogtec Brandschutz GmbH & Co. KG

[FÖR2012] Försth, M. “Optimisation of Radiation Absorption by Water Mist” Brandposten 46, 2012.

[GAN 2002] Gann, R. G. Proceedings of HOTWC-2002 12th, Halon Options Technical Working. Conference, Albuquerque, NM. 2002. [Available: http://www.fire.nist.gov/bfrlpubs/fire02/art091.html, viewed on 27.09.07.]

[GRE 2005] Gressmann „Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz“ 2. Auflage; Expert Verlag 2005

[HAA 2008] Haack, A., Meyeroltmanns, W., STUVA, Hosser, D., Richter, E.: Sicherheitstechnische Beurteilung und Anforderung an den baulichen Brandschutz in Eisenbahntunneln mit Tübbingauskleidung ,iBMB, 2008 (unveröffentlicht)

[HÄQ2009] Häggkvist, A. “*Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels. An overview of current research, standards and attitudes”* Luleå University of Technology. 2009.

[IFP 2006] International Fire Protection – Issue 26 – Mai 2006

[ING 2011] Ingason H. et al., Runehamar Tunnel Fire tests, SP Technical Research Institute of Sweden. SP Report 2011:55, 2011

[KRA 2008] Kratzmeir, „Substitution – Promising Results, Challenge for the Future“. IWMA-COSUF Conference on Fire Suppression in Tunnels. 2.4-3.4.2008

[LAK 2012] Lakkonen, “Fixed Fire Fighting Systems in Tunnels – The SOLIT Research Project. ISTSS 2012. 14.3-16.3.2012

[LÄM 2009] Lämmerhirt, K. Reaktion von Wassernebel mit Stoffen die bei Kontakt mit Wasser eine exotherme Reaktion verursachen. Masterarbeit. 2008.

[NFP 502] NFPA 502: "Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways". Aktuelle Ausgabe: 2011

[SCA 2012] http://www.scania.de/trucks/maincompo-nents/chassis/Tankkapazitaet/Ausfuehrungen.aspx

[SCH 2007] EU-Sicherheitsdatenblatt: One Seven® Klasse B-AFFF Schaummittel

Ausgabe-Datum: 26.11.98 Überarbeitet am: 17.10.07

[SIN 2005] Runehamar One Seven

[SOL 2007] SOLIT (Safety of Life in Tunnels), Water Mist Fire Suppression Systems for Road Tunnels, Final Report, Germany, 2007.

[STA 2007] Starke, H. „SOLIT Messkonzept und Versuchsauswertung" Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt Bericht 442 (nicht öffentlich), 2007

[THE 2011] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: Eine softwaregestützte Analyse für ganzheitliche Bewertungen von offenen und geschlossenen Bauweisen unterirdischer Infrastrukturprojekte – Teil 1: Theoretische Grundlagen multikriterieller Bewertungsverfahren. In: GSTT Informationen 25-1, 2011

[THE 2012] http://de.thefreedictionary.com/kompensieren am 13.04.2012

[THW 2011] Thewes, M., Kamarianakis, S., Bielecki, R.: Eine softwaregestützte Analyse für ganzheitliche Bewertungen von offenen und geschlossenen Bauweisen unterirdischer Infrastrukturprojekte –Teil 2: : Anwendung der Software auf ein konkretes Bauprojekt. In: GSTT Informationen 25-2, 2011

[TUN 2008] Zeitschrift Tunnel, Jahrgang 2008

[UPT 2006] Opstad, K., UPTUN R231 Mitigation – New Technologies

[VDS 2108] VdS-Richtlinien für Schaumlöschanlagen - Planung und Einbau

[YU 2011] On Establishing Common Requirements for Existing Water Mist Systems in Protecting Ordinary Fire Hazard Occupancies

IWMA Conference 2011

4.3 Weiterführende Literatur

Beard A. and Carvel R. (editors), "Handbook of Tunnel Fire Safety", 2nd Edition, ICE Publishing, The United Kingdom, November 2011.

Bouthors B. "Eurotunnel – SAFE Stations" International Conference on Safety in Life in Tunnels" Berlin July, 2012.

Cesmat, E. et al. "Assessment of Fixed Fire-Fighting Systems for Road Tunnels by Experiments at Intermediate Scale", Proc. of 3rd International Symposium on Tunnel Safety & Security. Stockholm, Sweden, 2008.

CETU, "Water Mist in Road Tunnels", Information document, France, 2010.

Christensen, E., "UPTUN Guidance – Minimum requirements for Fire Suppression Systems in Tunnels", IWMA Conference on Fire Suppression in Tunnels, Munich, Germany, April 2-3, 2008.

Haack, A., Lakkonen, "Fire Suppression in Rail Tunnels – 3rd party tasks and execution with case Eurotunnel SAFE", KVIV seminar, Antwerp, Belgium, November 23, 2010.

Haack, A. "Position of PIARC – Latest discussion and views on Fixed Fire Suppression Systems", 3rd International conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Austria, May 15-17, 2006.

Husted, B. "Experimental Measurements of Water Mist Systems and Implications for Modeling in CFD" Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering Lund University, 2007

Joyez, P. and Lakkonen, M., "Eurotunnel SAFE project", IWMA (International Water Mist Association) conference, Prague, Czech republic, November 3-4, 2010.

Jönsson J. and Johnson, P., "Suppression systems – trade-offs and benefits", Proc 4th Int Symp on Tunnel Safety & Security, Frankfurt am Main, Germany, March 17-19, 2010.

Johnson, P. "Burnley Tunnel Fire - The Arup View", 2007

Kratzmeir, S., “Protection of Tunnels with Water Mist Systems”, FIRESEAT 2011 – The Science of Fire Suppression, Edinburgh November 11, 2011

Kratzmeir, S. “Compensatory Effects of Fixed Fire Fighting Systems in Tunnels”, Tunnel Safety and Ventilation, Graz, Austria, April 23 -25, 2012

Kratzmeir, S., “Designing Ventilation Systems related to Evacuation”, Tunnelling20Twenty – COSUF Workshop, Hongkong, China November 18-19, 2011

Lakkonen, M., “Fixed Fire Fighting systems – Status review of technology”, 3rd Annual Fire Protection & Safety in Tunnels 2011, Salzburg, Austria, October 11-12, 2011.

Lakkonen, M., “Modern fixed fire fighting systems for tunnels – Design, integration and costs”, 6th International conference on traffic and safety in road tunnels, Pöyry Infra, Hamburg, Germany, May 10-12, 2011.

Lakkonen, M., “Status Review of Fixed Fighting Systems for Tunnels – SOLIT2 Research program and Eurotunnel case study”, Proceedings of KRRI conference on Fire safety and disaster prevention for GTX deep tunnels, Seoul, Korea, November 28, 2011.

Lakkonen, M., Bremke, T., “Fixed Fighting Systems for Road and Rail Tunnels”, Tunnel Magazine 1-2012, pages 40-46. Official journal of STUVA, Germany, February 1, 2012.

Lakkonen, M., Kratzmeir, S., Bremke, T. and Sprakel, D., “Road tunnel protection by water based fire fighting systems: Implementation of full scale fire tests into actual projects”, International Fire Protection Magazine, MDM Publishing , The United Kingdom, February 2008.

Leucker, R. and Kratzmeir, S., “Fire tests for Water Mist Fire Suppression Systems”, Tunnel Journal 8/2011, 42-55, 2011.

Leucker, R. and Kratzmeir, S., “Results of Fire Tests to assess the Efficiency of Water Mist Fire Fighting Systems in Road Tunnels” Proceedings of STUVA Conference 2011, Berlin, Germany, 6-8, December, 2011.

Leucker, Roland (2012): Mobilität – ein unkalkulierbares Risiko? BMBF-Innovationsforum "Zivile Sicherheit". Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Berlin, 17.04.2012. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pubRD/B4-I_Leucker_Roland_Praesentation_2012.pdf, zuletzt geprüft am 04.05.2012.

Leucker, Roland (2011): Verkehrssicherheit und zivile Sicherheit – eine intermodale Aufgabe? In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hg.): Straßentunnel in Deutschland - Neuheiten zur Sicherheit. Bergisch Gladbach, S. 7–8.

Leucker, Roland (2009): International Views and Outlook on Safety in Tunnels. In: Merisis (Hg.): Tunnel Summit China 2009, 26.-27.03.2012.

Leucker, Roland (2007): Life Cycle Cost Modelling for Tunnels. In: CD-ROM proceedings. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Tunneling ; August 27 - 29, 2007, Vienna, Austria. European Community on Computational Methods in Applied Sciences; Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen. Vienna.

Lönnermark, A. and H. Ingason. The Effect of Cross-sectional Area and Air Velocity on the Conditions in a Tunnel during a Fire. SP Report 2007:05. Borås, Sweden, 2007.

Meijr, JG., Meeussen, V. “New Development for a Fixed Fire Fighting System in Road Tunnels” TUNNEL, Issue 5, 2008

NFPA, “Fire Protection Handbook 2008”, National Fire Protection Association, The USA, 2008.

Opstad, K., “Fire scenarios to be recommended by UPTUN WP2 Task leader meeting of WP2”, Minutes from a meeting in London 05-09-08, 2005.

PIARC tech. committee C3.3, “Road Tunnels: An assessment of fixed fire fighting systems”, Report 2008R07, World road association (PIARC), France, 2008.

Ponticq, X., “Etudes sur les syst emes xes d'aspersion d'eau en tunnel”, PhD Thesis, CETU, France, February 2009.

SOLIT (Safety of Life in Tunnels), Water Mist Fire Suppression Systems for Road Tunnels, Final Report, Germany, 2007.

Stroeks, R. “Sprinklers in Japanese Road Tunnels” Chiyoda Engineering Consultants Ltd. Project Report BFA-10012, 2001

Tarada, F. and Chan, E. “Crossing Points”, Fire Management Journal, 2-5, March, 2009.

Tuomisaari, M., “Full scale fire testing for road tunnel applications – evaluation of acceptable fire protection performance”, Proc. 3rd Int. Symp on Tunnel Safety & Security, Stockholm, Sweden, March 12-14, 2008.

United Nations, “ADR – European Agreement Considering the International Carriage of Dangerous Goods, Vol. 1&2”, Edition 2011, United Nations, 2010.

Vollman, Götz; Leucker, Roland; Sprakel, Dirk K. (2012): ITA-COSUF: The Operation of Safe and Secure Underground Facilities. In: Tunnel (3), S. 18–21.