



SOLIT Safety of Life in Tunnels

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

**Wissenschaftlicher Abschlussbericht zum
SOLIT² Forschungsvorhaben,
erstellt durch das SOLIT² Forschungskonsor-
tium**

**Anhang 4
Beispielhafte Anwendung der Risikoanalyse**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

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

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

Einordnung

Im Rahmen des Verbundprojektes zum Forschungsprojekt 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 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 im Sinne der Förderrichtlinien des BMWi. Daneben ist der Leitfaden Teil der Arbeitspakete. Die Einzelberichte sind über den Projektkoordinator erhältlich.

Impressum:

Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung

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 Piazzolla

TÜV Süd Rail GmbH

Jürgen Heyn

Jakob Zaranek

Lutz Neumann

IFAB Institut für angewandte Brandschutzforschung GmbH

Stefan Kratzmeir

Rajko Rothe

Institut der Feuerwehr Sachsen Anhalt

Mario Koch

Horst Starke

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

Herausgeber:

SOLIT² Forschungskonsortium, bestehend aus:

BUNG 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: 2.0; 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

1.	Einleitung.....	5
1.1	Vorwort.....	5
1.2	Vorgehen.....	5
1.3	Begriffserklärungen	6
2.	Modelltunnel	7
2.1	Tunnelgeometrie	7
2.2	Verkehrsverhältnisse	7
2.3	Lüftungssystem.....	7
3.	Untersuchungsfälle und –szenarien	8
3.1	Untersuchungsfälle.....	8
3.2	Untersuchungsszenarien	8
3.2.1	Richtungsverkehrsbetrieb	8
3.2.2	Brandort.....	8
3.2.3	Brandleistung	8
3.2.4	Zeitraum (Tag/Nacht)	9
3.2.5	Verkehrszustand	9
3.2.6	Branddetektion	9
3.2.7	Tunnelsperrung	9
3.2.8	Aktivierung des Lüftungssystems.....	9
3.2.9	Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage	9
3.2.10	Erhöhtes Schadensausmaß.....	9
3.2.11	Fremdrettung	9
3.3	Übersicht der Untersuchungsszenarien	9
4.	Risikoanalyse	10
4.1	Häufigkeitsermittlung	10
4.1.1	Ermittlung der Häufigkeit H_0 des Initialereignisses Brand.....	10
4.1.2	Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf	10
4.2	Schadensausmaßbestimmung	11
4.2.1	Numerische Ausbreitungsberechnung zur Brandsimulation	11
4.2.2	Modellierung des Tunnels	11
4.2.3	Schadensausmaße	11
4.2.4	Simulationsergebnisse	12
5.	Risikoermittlung und Bewertung.....	15
5.1	Wirkung der WN-BBA bei reiner Längslüftung	15
5.2	Kompensation einer Rauchabsaugung über Zwischendecke.....	15
5.3	Plausibilitätsprüfung der Bewertung	16
6.	Fazit und Ausblick	18
7.	Quellenverzeichnis	19
7.1	Abbildungen	19
7.2	Literatur	19

1. Einleitung

1.1 Vorwort

Dieser Anhang ist Bestandteil des Leitfadens zum Forschungsprojekt SOLIT² „Leitfaden zur ganzheitlichen Bewertung von Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen sowie deren Planung“.

Mit Hilfe einer quantitativen Risikoanalyse wird das Schutzziel „Tunnelnutzer“ betrachtet (vgl. Abbildung 1). Dazu werden die Sicherheitsniveaus von Ausstattungsvarianten nach dem BAST-Bericht B 66 [BAS 2009] betrachtet, wobei die Auswirkungen der Tunnelausstattungen mit und ohne Brandbekämpfungsanlage (BBA) im Fokus stehen. Die Anwendung der in Teil 3 des Leitfadens beschriebenen Methodik wird im vorliegenden Anhang 4 beispielhaft an einem Modelltunnel angewendet, der in der entsprechenden Variante mit einer in den Großbrandversuchen von SOLIT² intensiv untersuchte Wassernebeltechnik ausgerüstet ist. Wegen der notwendigen spezifischen Betrachtung

können die Ergebnisse nicht auf andere Techniken von Brandbekämpfungsanlagen übertragen werden.

Weitergehende Schutzzielbetrachtungen wie beispielsweise Sachschäden, Verfügbarkeit von Straßentunneln bzw. mögliche Ausfallzeiten werden nicht separat ausgewiesen und sind Inhalt des Kapitels 3.5 des Leitfadens.

Informationen zur Wirkungsweise und den Parametern der betrachteten WN-BBA können dem Kapitel 2.4 des Leitfadens entnommen werden.

1.2 Vorgehen

Ziel des Verfahrens ist es die für unterschiedliche Ausstattungsvarianten vorhandenen Sicherheitsniveaus vergleichbar zu machen. Eine Kompensation von richtliniengetreuen Ausstattungselementen ist danach nur möglich, wenn das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird. Zur Bewertung der Sicherheit dient das Risiko, das sich aus Ereignishäufigkeiten und zugehörigen Schadensausmaßen ergibt. Die Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten für

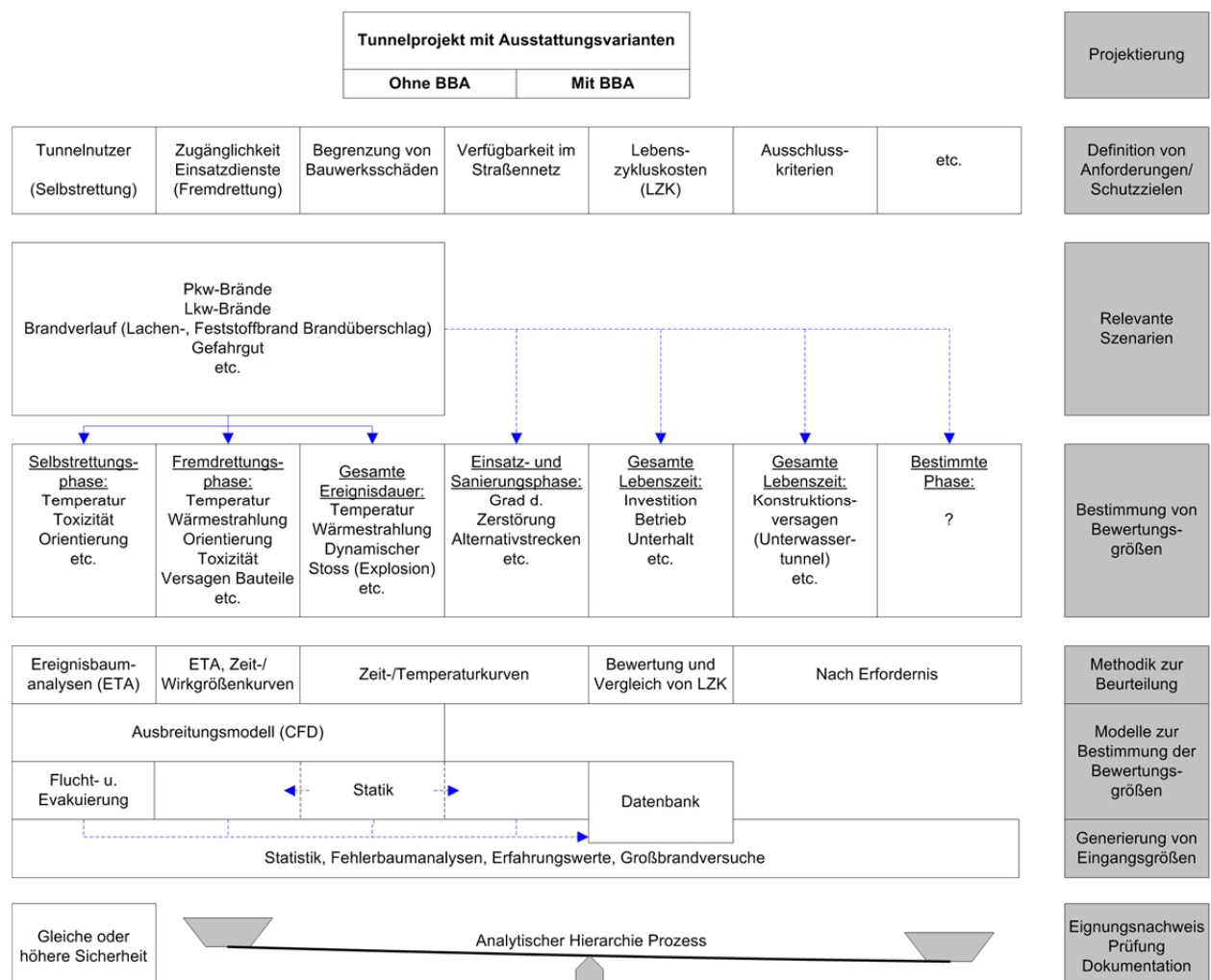


Abbildung 1: Ablaufschema zum Nachweis des Kompensationspotenzials einer BBA – der vorliegende Anhang 4 behandelt das Schutzziel Tunnelnutzer (linke Spalte)

die Endzustände erfolgt mit Hilfe von Ereignisbäumen (Event Trees) entsprechend dem Kapitel 3.3.3 des Leitfadens. Die Betrachtung der Initialereignisse beschränkt sich dabei auf den für die Auslegung der Sicherheitsmaßnahmen (Brandlüftung, Branddetektion etc.) relevanten Szenariotyp „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“¹. Die Abschätzung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisbaum erfolgt mittels Statistiken bzw. Erfahrungswerten.

Die Ermittlung der zur Berechnung notwendigen Schadensausmaße für die selteneren Ereignisse mit Brandfolge erfolgt mit Hilfe von numerischen Simulationsrechnungen (CFD-Berechnungen). Die Simulationsmodelle wurden auf Basis der im Projekt durchgeführten Großbrandversuche kalibriert. Weitere Erläuterungen zur Schadensausmaßermittlung sind im Kapitel 2.7 und 3.3.4 des Leitfadens zu finden.

Mit Hilfe der Darstellung des Risikos in Häufigkeits-Ausmaßdiagrammen (HA-Diagrammen) werden exemplarisch die jeweils ermittelten Sicherheitsniveaus einander vergleichend gegenübergestellt. Beispielhaft wird das Vorgehen an einem Modelltunnel gezeigt, wobei das Referenzsicherheitsniveau das eines nach RABT 2006 ausgestatteten Modelltunnels ist.

1.3 Begriffserklärungen

Bemessungsbrand	Brandgröße zur Dimensionierung von Brandschutzeinrichtungen. Dabei handelt es sich nicht um die maximal auftretende Brandgröße.
BBA	Brandbekämpfungsanlage
CFD	Computual Fluid Dynamics
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke im Querschnitt
Durchzündung	Schneller Übergang von einem Entstehungsbrand zum Vollbrand durch das Zünden aller brennbaren Oberflächen innerhalb eines Brandereignisses oder naher Objekte

EV	Expected Value, Schadenerwartungswert, Kollektives Risiko: Darstellung des Risikos als Punktwert
Expected Value	s. unter EV
Flashover	s. Durchzündung
GV	Gegenverkehr – Verkehrsart ohne richtungsgetrennte Verkehrsführung
HDWN	Hochdruck- Wassernebel
HRR	Heat Release Rate (Energiefreisetzungsrate) von Bränden
LL	Mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren
RA	Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
Rauchgasdurchzündung	Verbrennen von Pyrolysegasen einer Rauchsicht
Rollover	s. Rauchgasdurchzündung
RV	Richtungsverkehr - Verkehrsart mit richtungsgetrennter Verkehrsführung
Schadenerwartungswert	s. unter EV
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

¹ Für eine vollständige quantitative Risikoanalyse nach [BAS 2009] ist auch das Kollisionsrisiko abzubilden. Dieses ist jedoch unabhängig vom Einsatz einer stationären Brandbekämpfungsanlage sowie weiterer im Brandfall wirksamer Maßnahmen und immer identisch.

2. Modelltunnel

Straßentunnel können durch verschiedene Parameter (z. B. Länge, Querschnittsgröße, Längsneigung, Richtungs- oder Gegenverkehr) und ihre sicherheitstechnische Ausstattung (z. B. Lüftungsanlage) unterschieden werden. Stellvertretend für die Vielzahl unterschiedlicher Kombinationsmöglichkeiten wird mit einem definierten „Modelltunnel“ beispielhaft Brandsimulationen für unterschiedliche Lüftungssysteme und eine Wasserebel-Brandbekämpfungsanlage (WN-BBA) durchgeführt. Ziel dabei ist, das evaluierte Simulationsmodell zu erproben und die grundsätzliche Kompensation von baulich-/ technischen Anlagen durch eine WN-BBA nachzuweisen. Die Ausbildung dieses Modelltunnels erfolgt stellvertretend für länderspezifische Normungen entsprechend den Vorgaben in den deutschen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Damit bei vergleichenden System-Gegenüberstellungen die Ergebnisse nicht durch unterschiedliche Vorgaben beeinflusst werden, sind einheitliche Randbedingungen, insbesondere hinsichtlich der geometrischen und atmosphärischen Verhältnisse, berücksichtigt.

Nachfolgend wird der betrachtete „Modelltunnel“ für die Risikoanalyse vorgestellt.

2.1 Tunnelgeometrie

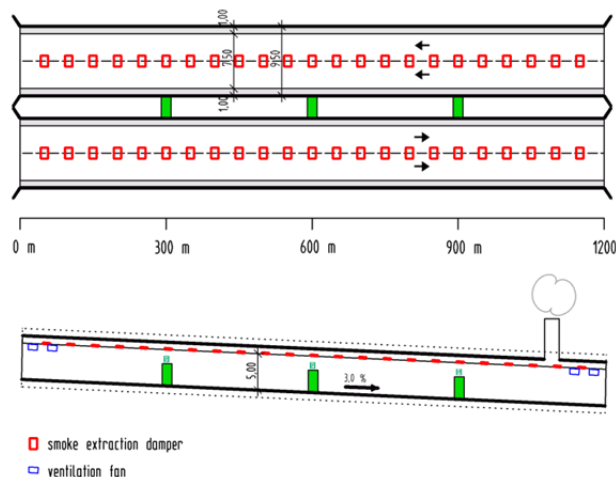


Abbildung 2: Grundriss und Längsschnitt des Modelltunnels

Bei dem Modelltunnel handelt es sich um einen 1.200 m langen Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen je Richtung ohne Standstreifen. Die Längsneigung beträgt 3 %. Der Querschnitt des Fahrraums wird in allen Fällen rechteckig mit den lichten Maßen 9,50 m x 5,00 m gewählt.

Die geometrischen Verhältnisse des Tunnelraums, die Sicherheitseinrichtungen sowie das angenommene Verkehrsaufkommen des Modelltunnels

werden in den betrachteten Fällen nicht verändert, damit eine identifizierte Wirkung eindeutig der BBA zuzuordnen ist.

2.2 Verkehrsverhältnisse

Der Tunnel entspricht hinsichtlich der angenommenen Verkehrsbelastung einem üblichen hochbelasteten Tunnel im bundesdeutschen Fernstraßennetz. Ein DTV von 60.000 Kfz pro Tag mit einem Schwerverkehrsanteil von 18 % ist insbesondere bei Prognosewerten für das Jahr 2025 sehr häufig anzutreffen. Weiterhin liegt der Untersuchung die Annahme zu Grunde, dass es in dem Tunnel täglich zu Stauereignissen kommt. Diese können z. B. durch hoch belastete Zu- und Abfahrten im Anschluss an den Tunnel verursacht werden.

2.3 Lüftungssystem

In der Risikoanalyse werden je nach betrachtetem Fall (s. Abschnitt 3.1) unterschiedlichen Lüftungssysteme simuliert.

Wegen der Tunnellänge von 1.200 m in Kombination mit dem täglich auftretenden Stau besteht das Lüftungssystem nach RABT im Referenzfall (Abbildung 3) aus einer Rauchabsaugung über eine Zwischendecke mit Lüftungsklappen. Im Untersuchungsfall 1 (Abbildung 4) wird die Lüftung über eine reine Längslüftung mit Strahlventilatoren erreicht.

Für die Dimensionierung der Brandfalllüftung wird nach RABT 2006 aufgrund der angenommenen Lkw-Fahrleistung von mehr als 6.000 Lkw Kilometer pro Tag und Röhre für den Modelltunnel von 100 MW Bemessungsbrandleistung ausgegangen.

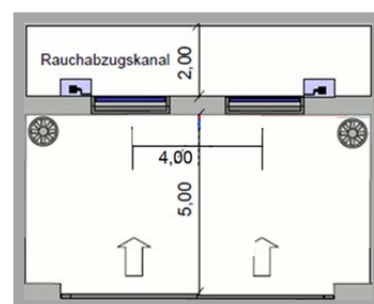


Abbildung 3: Querschnitt im Referenzfall

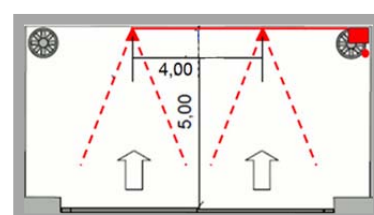


Abbildung 4: Querschnitt im Untersuchungsfall 1

3. Untersuchungsfälle und -szenarien

3.1 Untersuchungsfälle

In der hier dokumentierten quantitativen Risikoanalyse wird zum einen die Wirkung einer zusätzlichen Brandbekämpfungsanlage bei einem Tunnel mit reiner Längslüftung untersucht und zum anderen die Möglichkeit der Kompensation.

Für die in Tabelle 1 zusammengestellten Fälle wird das jeweilige Sicherheitsniveau des Modelltunnels bestimmt, wobei die Schadenausmaßermittlung mit Hilfe von entsprechenden Simulationsrechnungen verschiedener Untersuchungsszenarien bestimmt wird.

Untersuchungsfälle	Lüftungssystem im Brandfall
Referenzfall	Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen und Strahlventilatoren zur Strömungskontrolle (Bemessungsbrandleistung 100 MW)
Untersuchungsfall 1 ohne WN-BBA	Mechanische Längslüftung (Bemessungsbrandleistung 100 MW)
Untersuchungsfall 1 mit WN-BBA	Mechanische Längslüftung (Bemessungsbrandleistung 100 MW)

Tabelle 1. Übersicht der untersuchten Fälle

Zusätzliche Ausstattung mit WN-BBA (Erhöhung des Sicherheitsniveaus):

Die Wirkung einer zusätzlich zu der nach RABT notwendigen Ausstattung installierten WN-BBA wird in einer ersten Betrachtung untersucht.

Dabei ist der Vergleichsfall ein Tunnel mit reiner Längslüftung, die für Richtungsverkehrstunnel von 1.200 m Länge ohne täglich stockenden Verkehr die Regelausstattung darstellt.

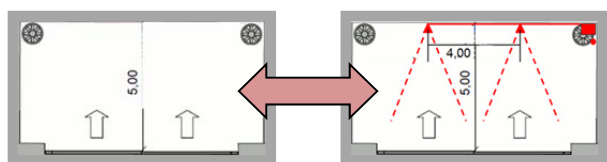


Abbildung 5: Vergleich Untersuchungsfall 1 ohne und mit BBA

Kompensation der Rauchabsaugung durch WN-BBA (Beibehaltung des Sicherheitsniveaus):

Bei diesem Vergleich wird die im Referenzfall vorgesehene Rauchabsaugung über eine Zwischendecke mit gesteuerten Klappen durch eine WN-BBA in Kombination mit einer Längslüftung ersetzt.

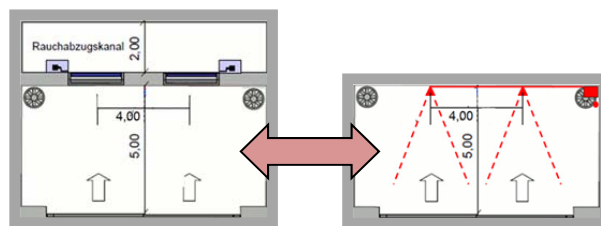


Abbildung 6: Vergleich Referenzfall und Untersuchungsfall 1

3.2 Untersuchungsszenarien

Die Ereignishäufigkeit und das Schadensausmaß werden gemäß [BAS 2009] durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die in einzelnen Szenarien zu untersuchen sind. Wesentliche Faktoren sind:

3.2.1 Richtungsverkehrsbetrieb

Die Tunnelröhren werden im Richtungsverkehr betrachtet. Die Möglichkeit eine Röhre zeitweise im Gegenverkehr zu betreiben, ist nicht Gegenstand der Untersuchung.

3.2.2 Brandort

Das zu erwartende Schadensausmaß kann durch die Lage des Brandortes beeinflusst werden. Als Brandort wird im Rahmen der Untersuchungen die Tunnelmitte festgelegt.

3.2.3 Brandleistung

Als Brandleistung wird in der Regel die maximale Energiefreisetzungsrate, welche über eine signifikante Zeitdauer auftritt, bezeichnet.

In Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie unterscheiden sich die Brandszenarien gemäß RABT 2006. Für einen Pkw-Brand wird eine Brandleistung von 5 MW angenommen. Einem Bus- oder Lkw-Brand wird eine Brandleistung von 30 MW zugrunde gelegt. Bei der im Rahmen dieser Untersuchung angenommenen Lkw-Fahrleistung von > 6000 Lkw-km pro Tag und Röhre sind nach RABT 2006 auch Brandleistungen von 100 MW zu berücksichtigen. Dies entspricht dem Brand mehrerer Fahrzeuge.

In der vorliegenden Risikoanalyse werden Flüssigkeitsbrände (Lachenbrände), bei denen es unmittelbar nach der Zündung zu einer sehr schnellen Brandentwicklung kommt, untersucht. Diese stellen nach [BAS 2009] im Vergleich zu langsamer beginnenden Feststoffbränden für die Bemessung das maßgebende Szenario dar, kommen jedoch nur selten vor. Nähere Ausführungen zu Brandverläufen in Straßentunneln sind in dem Leitfaden, Kapitel 2.5.1 ausführlich beschrieben.

3.2.4 Zeitraum (Tag/Nacht)

Einen wesentlichen Einfluss auf das zu erwartende Schadensausmaß hat die Anzahl der potenziell betroffenen Personen im Ereignisfall. Zur Berücksichtigung unterschiedlichen Personenaufkommens werden daher Zeiten mit hohem und mit geringem Verkehrsaufkommen unterschieden.

3.2.5 Verkehrszustand

Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Brandereignisses. Es wird zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau, resultierend aus verkehrlicher Überlastung oder durch Rückstaubildung z. B. durch einen Unfall unterschieden. Im Fall eines Brandereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden sich die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge an dem Brandherd aufstauen, während die auf der stromabwärtigen Seite befindlichen Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können. In Abbildung 7 ist die sich bei freiem Verkehrsfluss einstellende Stausituation dargestellt.



Abbildung 7: Stausituation nach Brand bei primär freiem Verkehrsfluss

Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Staus infolge von Überlastung bzw. Störungen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. Hierbei können Tunnelnutzer beidseitig des Brandherdes der Gefahr von Rauch und Temperatur ausgesetzt sein. Abbildung 8 zeigt die Situation bei stockendem Verkehr bzw. Stau.

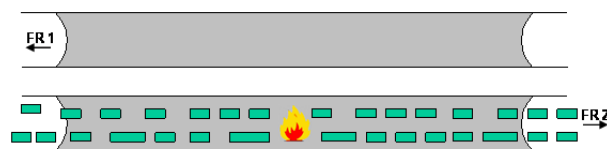


Abbildung 8: Stausituation nach Brand bei primär stockendem Verkehr bzw. Stau

3.2.6 Branddetektion

Die Alarmierung der Tunnelnutzer im Brandfall sowie das Aktivieren der jeweiligen Sicherheitseinrichtungen haben signifikante Auswirkungen auf das jeweilige Schadensausmaß. Es wird daher unterschieden zwischen einer nach RABT erfolgreichen Detektion innerhalb von 60 s bzw. keiner Detektion.

3.2.7 Tunnelsperrung

Durch eine Sperreinrichtung kann verhindert werden, dass nach der Detektion eines Schadensereignisses weitere Fahrzeuge in den Tunnel einfahren und somit zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes führen. Für die Tunnelsperrung wird eine erfolgreiche Detektion des Brandes innerhalb von 60 s vorausgesetzt.

3.2.8 Aktivierung des Lüftungssystems

Die Rauchausbreitung und somit das Schadensausmaß infolge Rauch- und Temperatureinwirkung ist abhängig von der Aktivierung der Lüftungseinrichtungen nach Detektion des Brandes.

Somit ist der Erfolgsgrad der Aktivierung des Lüftungssystems, unter Voraussetzung einer erfolgten Detektion, mit zu berücksichtigen.

3.2.9 Aktivierung der Brandbekämpfungsanlage

Durch die Aktivierung der WN-BBA lässt sich die Brandausbreitung eindämmen und die schädlichen Einwirkungen auf den Tunnelnutzer reduzieren. Der Erfolgsgrad der Aktivierung wird im Untersuchungsfall 1 bei erfolgreicher Detektion innerhalb von 60 s berücksichtigt.

3.2.10 Erhöhtes Schadensausmaß

Bei der unmittelbaren Beteiligung von Bussen ist aufgrund der hohen Personendichte im Ereignisfall ein erhöhtes Schadensausmaß zu erwarten.

3.2.11 Fremdrettung

Da in der vorliegenden Risikoanalyse in erster Linie gemäß RABT die Selbstrettung der Tunnelnutzer im Vordergrund steht, wird eine Schadensausmaßminderung infolge rechtzeitigem Eintreffens von Rettungskräften nicht weiter berücksichtigt (siehe hierzu Leitfaden Kapitel 2.2.1).

3.3 Übersicht der Untersuchungsszenarien

In Tabelle 2 sind die betrachteten maßgeblichen Ereignisabläufe mit den das Schadensausmaß beeinflussenden Parametern dargestellt. Die Anzahl der Endzustände sind für die Szenarien (links) sowie die dazu erforderlichen Simulationen (rechts) zusammengestellt. Unterschieden wird dabei der Referenzfall (RF) mit Längslüftung (LL) und Rauchabsaugung (RA) sowie der Untersuchungsfall 1 (UF 1) mit reiner Längslüftung und Brandbekämpfungsanlage (BBA). Die Anzahl der Endzustände bzw. Simulationen ergibt sich durch spaltenweise Multiplikation der Entscheidungspunkte je Untersuchungskategorie. Die Korrekturen resultieren aus der Voraussetzung einer

erfolgreichen Detektion des Brandes innerhalb von 60 s für die Aktivierung der Sperreinrichtungen, des Lüftungssystems und der WN-BBA.

Szenarien	Untersuchungs Szenarien		CFD-Simulationen	
	Fall	RF	UF 1	RF
Lüftungssystem	LL +RA	LL +BBA	LL +RA	LL +BBA
Querschnitt Fahrraum	Rechteck		Rechteck	
Anzahl Röhren	1	1	1	1
Betriebszustand RV/GV	1	1	1	1
Abstand Notausgänge	1	1	1	1
Anzahl Brandorte	1	1	1	1
Brandleistung 5/30/100 [MW]	3	3	3	3
Zeitraum Tag Nacht	2	2	1	1
Verkehrszustand Frei / Stau	2	2	2	2
Detektion ≤ 60 sec ja / nein	2	2	2	2
Tunnelsperrung ja /nein	2	2	1	1
Lüftungssystem aktiviert ja / nein	2	2	2	2
BBA aktiviert ja / nein	1	2	1	2
Erhöhtes Ausmaß ja / nein	2	1	1	1
Fremdrettung	1	1	1	1
Anzahl Szenarien/Endzustände	192	384	24	48
Korrektur	-4	-8	-2	-4

Tabelle 2. Anzahl der Untersuchungsszenarien und erforderlichen CFD-Simulationen für die einzelnen Fälle Referenzfall (RF) und Untersuchungsfall (UF 1)

4. Risikoanalyse

Die quantitative Risikoanalyse wird für den Modelltunnel nach dem Heft 66 der BASt [BAS 2009] durchgeführt. Das methodische Vorgehen ist im Leitfaden, Kapitel 2.7 beschrieben. Das Risiko wird danach durch die Häufigkeit und das Schadensausmaß von Ereignissen bestimmt, wobei die Anzahl von Todesopfern als Schadenindikator dient.

4.1 Häufigkeitsermittlung

4.1.1 Ermittlung der Häufigkeit H_0 des Initialereignisses Brand

Die Eintrittshäufigkeit der Brände infolge eines Unfalls oder eines technischen Defektes werden mittels fahrleistungsabhängiger Raten auf Basis der Erkenntnisse aus aktueller Forschung [BAS 2009] bestimmt.

Die Methode der Ereignisablaufanalyse erfordert nach der Identifizierung der auslösenden Ereignisse die Bestimmung der zugehörigen Eintrittshäufigkeiten. Die Eintrittshäufigkeit der Initialereignisse setzt sich zusammen aus den Bränden infolge Kollision und den Bränden infolge technischen Defekts. Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben und sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Die entsprechenden Eintrittshäufigkeiten basieren auf statistischen Angaben und sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Initialereignis (Top Event)	Beschreibung
Brand infolge Unfall	Die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls beträgt auf Basis des Forschungsberichts [BAS 2009] für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu- und Abfahrten $2,28 \cdot 10^{-7}$ [1/Fahrzeug*km]. Dieser Wert wird für die Tunnelröhren des Referenzfalls und des Untersuchungsfalls herangezogen. Nach [BAS 2009] ist in 0,30 % der Unfälle mit einem Kfz- Brand zu rechnen.
Brand infolge Selbstentzündung	Beim Initialereignis Selbstentzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert auf Grundlage der in [BAS 2009] hergeleiteten Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [1/Fahrzeug*km].

4.1.2 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf

Nachfolgend werden die Strukturen der im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Ereignisbäume erläutert.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung
5 MW / 30 MW / 100 MW	Für den Modelltunnel wird ein Lkw-Anteil von 18 % angenommen. Demzufolge wird weiter angenommen, dass in 82 % der Brandereignisse ein PKW- Brand mit 5 MW stattfindet. Es wird angenommen, dass es bei 6 % der Lkw-Brände zu einer Brandleistung von 100 MW kommt ² . Brandüberschläge auf andere Fahrzeuge werden nicht berücksichtigt.
Tageszeit Tag/Nacht	Als Tageszeit werden die Stunden mit hoher Verkehrsdichte von 06.00 bis 22.00 Uhr betrachtet, als Nachtzeit die Stunden von 22.00 bis 06.00 Uhr. Bezogen auf 24 h entspricht hierbei der Anteil der Stunden bei Tag 66,7 % und der Anteil der Stunden bei Nacht 33,3 %.

² Eine am Schwerverkehr abgeleitete Verteilung der Brandleistungen hat sich in der Praxis etabliert. Durch die vergleichende Gegenüberstellung der Risikokurven im HA-Diagramm, spielen in einer ähnlichen Größenordnung abgeschätzte Verteilungen der Brandlasten eine nur untergeordnete Rolle, sofern die untersuchten Maßnahmen einen nur begrenzten Einfluss auf die Brandleistung haben.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung
Verkehrszustand Freier Verkehr / Stau	Die Anzahl der potenziell betroffenen Tunnelnutzer ist vom vorherrschenden Verkehrszustand abhängig. Im Fall von Stau bzw. stockendem Verkehr können bedeutend mehr Personen als bei freiem Verkehrsfluss lebensbedrohlichen Einwirkungen ausgesetzt sein. Es wird die Annahme getroffen, dass Stau im Tunnel mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,34 % (30 h/a) eintritt.
Detektion Ja / Nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion zu 99 % innerhalb von 60 s erfolgt.
Tunnelsperrung Ja / Nein	Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen des Tunnels betroffen sein. Diese (oder andere technische Probleme) führen u. U. dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Es wird, im Sinne einer konservativen Annahme, davon ausgegangen, dass dies in 1 % der Fälle eintritt.
Lüftungssystem Ja / Nein	Die Belüftung des Tunnels erfolgt im: - Referenzfall über einzeln ansteuerbare Rauchabsaugvorrichtungen (Bemessungsbrandleistung 100 MW) und Strahlventilatoren zur Strömungskontrolle - Untersuchungsfall 1 über eine mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren. Nach erfolgreicher Detektion wird mit Hilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase beeinflusst bzw. der Rauch aus den Tunnelröhren abgesaugt. Es wird die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) das Aktivieren des entsprechenden Lüftungsprogramms nicht erfolgt.
WN-BBA Ja / Nein	Die Aktivierung der WN-BBA erfolgt mit der Branddetektion. Ihre volle Wirkung setzt nach weiteren 60 sec ein, d. h. 60 sec nach Detektion bzw. nach Brand. Es wird angenommen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) die WN-BBA aufgrund von technischen Problemen nicht einsetzt.
Erhöhtes Ausmaß Ja / Nein	Befindet sich beispielsweise ein Reisebus zum Zeitpunkt des Ereignisses im Gefahrenbereich, so ist mit einem erhöhten Schadensausmaß zu rechnen. Es wird die Annahme getroffen, dass in 1 % der Fälle mit einem erhöhten Ausmaß zu rechnen ist. Für die Erhöhung des Ausmaßes werden, wenn Bereiche mit keiner möglichen Selbstrettung auftreten, pauschal 20 Personen zu Grunde gelegt. Treten nur Bereiche mit bedingter Selbstrettung auf, so werden pauschal 10 Personen des Busses zum errechneten Ausmaß addiert.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung
Fremdrettung	Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. In der vorliegenden Risikoanalyse wird eine möglich Schadensausmaßreduzierung durch Fremdrettung nicht berücksichtigt.

4.2 Schadensausmaßbestimmung

4.2.1 Numerische Ausbreitungsberechnung zur Brandsimulation

Die Grundlage der Ausmaßermittlung bilden die numerischen Berechnungen zur Brandentwicklung und Rauchausbreitung. Die Anforderungen an die Rechenmodelle zur

- Strömungs- und Ausbreitsimulation
- Flucht- und Evakuierungssimulation
- Verkehrssimulation

sind im Leitfaden Kapitel 3.4 beschrieben.

4.2.2 Modellierung des Tunnels

Um eine möglichst realitätsnahe Abbildung des Modelltunnels zu erhalten wird dieser über seine gesamte Länge mitsamt seiner sicherheitstechnischen Einrichtungen wie Ventilatoren, Detektionssystemen und Notausgängen sowie den sich in den Röhren befindlichen Fahrzeugen abgebildet. Hierzu müssen zum einen die geometrischen Angaben in ein Rechengitter übertragen werden und zum anderen Anfangs- und Randbedingungen vorgegeben werden. Des Weiteren sind Angaben zur Simulationsdauer und zum Aktivieren und Deaktivieren des Lüftungssystems erforderlich.

4.2.3 Schadensausmaße

Das personenbezogene Schadensausmaß wird durch mehrere sich überlagernde Effekte bestimmt. Das Schadensausmaß ist zum einen abhängig von den Einwirkungen auf den menschlichen Organismus infolge äußerer Einflüsse durch Druck, Temperatur und Rauch und zum anderen von der Anzahl der potenziell gefährdeten Personen im betroffenen Abschnitt.

Die Anzahl der betroffenen Personen ist abhängig von der verkehrlichen Situation, dem Zeitpunkt der Detektion eines Ereignisses und Sperrung eines Tunnels sowie den momentanen Fluchtbedingungen im Tunnel.

Zur Abschätzung der jeweiligen Schadensausmaße wird der Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit verwendet. Durch Überlagerung dieses Zusammenhanges mit den nume-

risch berechneten Sichtweiten lassen sich in Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit und des Notausgangsabstands Selbstrettungsbereiche ableiten (siehe Leitfaden Kapitel 3.4.2.2).

Die Bestimmung der Schadensausmaße erfolgt durch Überlagerung der ermittelten Personendichten mit den berechneten Streckenabschnitten, aus denen eine „Selbstrettung“ möglich ist, eine „bedingte Selbstrettung“ erfolgen kann und „eine Selbstrettung“ nicht erfolgreich ist. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung wird zur Bestimmung der Schadensausmaße die Annahme getroffen, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

4.2.4 Simulationsergebnisse

Im Folgenden werden exemplarisch einzelne Ergebnisse von Untersuchungsszenarien aus den numerischen Berechnungen des Modelltunnels vorgestellt.

Der Start des Brandes erfolgt in allen Szenarien 60 Sekunden nach Simulationsbeginn, die Detektion nach weiteren 60 Sekunden. Nach insgesamt 180 Sekunden, also 120 Sekunden nach Zündung, setzt die Brandlüftung und falls vorhanden die WN-BBA ein. Die Ausbreitung der Einwirkgrößen ist bis zur 180. Sekunde in allen Fällen gleich³, danach ist sie sowohl vom jeweils zugrunde liegenden Lüftungskonzept und dem Vorhandensein der WN-BBA abhängig.

Temperatur

Im Folgenden sind für die drei untersuchten Fälle die Temperaturverläufe bei einem 30 MW Flüssigkeitsbrand (Kraftstofflache) dargestellt. Bis zum Beginn der Wirkung technischer Ausstattung (Sekunde 180) sind die Temperaturverteilungen annähernd gleich.

Für den Referenzfall mit Rauchabsaugung (Abbildung 9) wird die hohe Temperatur auf einen Nahbereich des Brandortes beschränkt, wobei direkt hinter dem Brandherd stehende Fahrzeuge über die gesamte Dauer durch einen Brandüberschlag gefährdet sind. Dies betrifft insbesondere hohe Fahrzeuge.

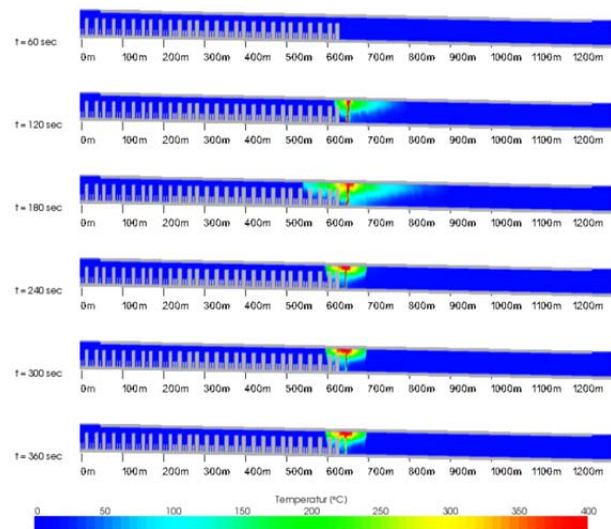


Abbildung 9: Temperatur
30 MW Brand, RA, freier Verkehr

Bei reiner Längslüftung (Abbildung 10) ist das Zurückdrängen des Backlayerings nach Einsatz der Längslüftung zu erkennen. Darüber hinaus sind im Fall der Längslüftung mit zusätzlicher WN-BBA (Abbildung 11) nach 240 Sekunden eine starke Abkühlung sowie die extreme Kapselung des Brandortes mit unkritischen Temperaturen erkennbar.

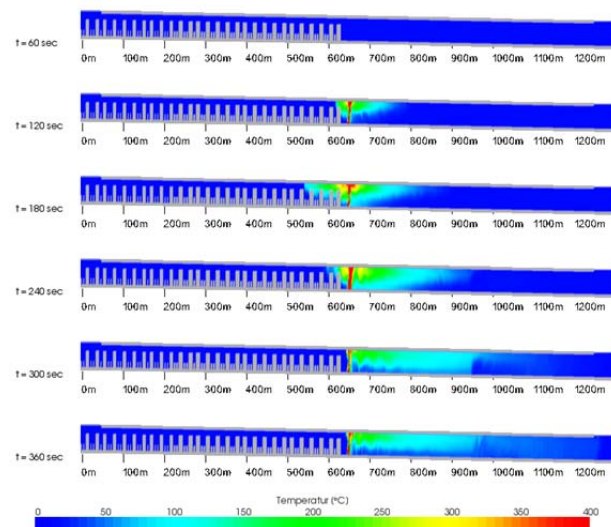


Abbildung 10: Temperatur
30 MW Brand, LL ohne WN-BBA, freier Verkehr

³ Die Aussage gilt bei den hier gewählten gleichen lichten Fahrraumprofilen für reine Längslüftung und Rauchabsaugung über Zwischendecke.

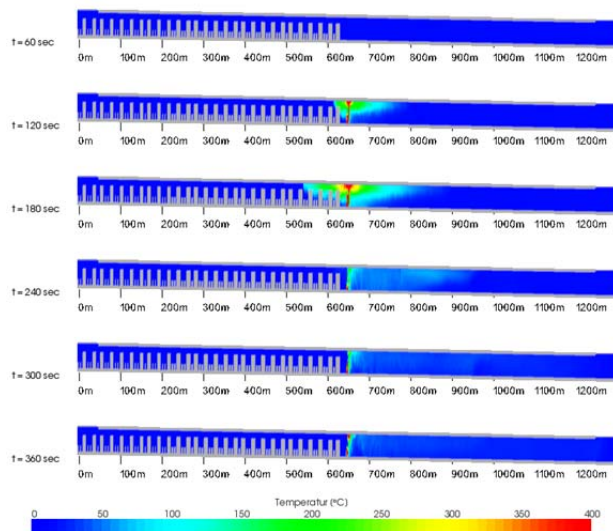


Abbildung 11: Temperatur
30 MW Brand, LL + WN-BBA, freier Verkehr

Sichtweite

Die folgenden Darstellungen (Abbildung 12 und Abbildung 13) zeigen die Einschränkung der Sichtweite infolge der Rauchgase eines 100 MW Brandes bei freiem Verkehr.

Die Ausstattungsvariante mit Rauchabsaugung (Abbildung 12) zeigt, dass die für diese Brandleistung dimensionierte Lüftung die Rauchgase auf einen Bereich von ca. 100 m beschränken können. Diese Rauchgase sind dabei beidseitig des Brandherdes vorhanden.

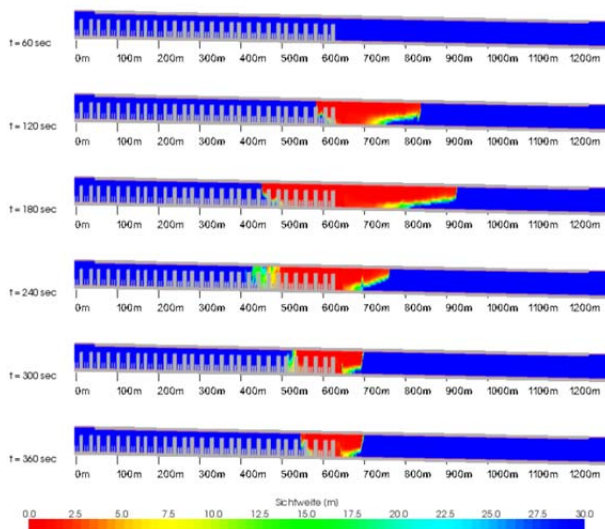


Abbildung 12: Sichtweite
100 MW Brand, RA, freier Verkehr

Im Falle einer reinen Längslüftung ist das Backlayering in der Anfangsphase durch die große Thermik sehr groß, so dass ein erheblicher Teil der Rauchgase über die Fahrzeuge wegzieht und den gesamten Tunnelquerschnitt ver Raucht. Die Zuschaltung der Längslüftung kann diese Rauchgase

langsam zur Downstreamseite zurückdrücken (Abbildung 13).

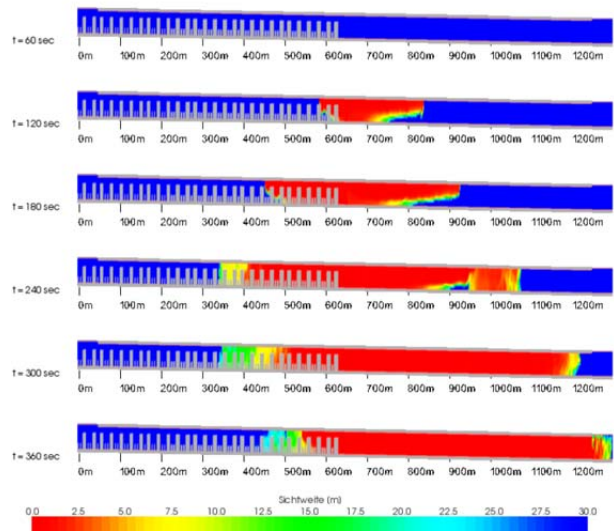


Abbildung 13: Sichtweite
100 MW Brand, LL ohne WN-BBA, freier Verkehr

Durch die starke Kühlung der Rauchgase ist beim Einsatz einer zusätzlichen WN-BBA die gleiche Lüftungsleistung erheblich effizienter, so dass der Bereich, in dem Fahrzeuge stehen, innerhalb von 180 Sekunden rauchfrei ist (Abbildung 14).

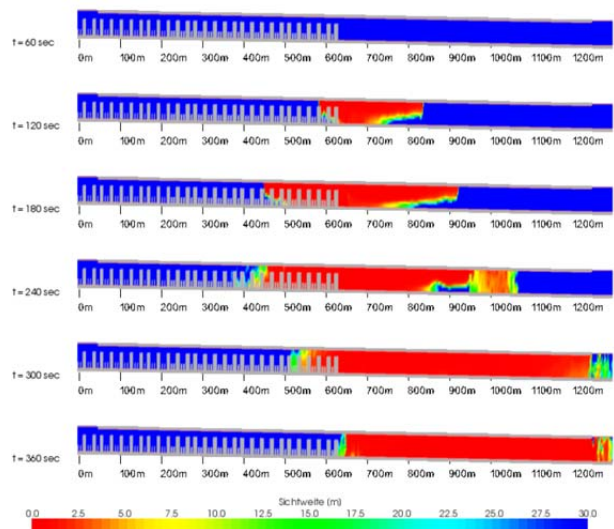


Abbildung 14: Sichtweite
100 MW Brand, LL+WN-BBA, freier Verkehr

Selbstrettungsbereiche

Die folgenden Abbildungen zeigen für einen Stau-fall den zeitlichen Verlauf der Rauchausbreitungs-front für eine Sichtweite von 5 m auf 1,50 m Höhe. Dazu sind die Selbstrettungsbereich für eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s und einem Beginn der Flucht nach 60 Sekunden dargestellt.

Im Falle der Rauchabsaugung über eine Zwischendecke werden ab der 180. Sekunde die

Rauchgase eines 30 MW Brandes mit der auf 100 MW-Brände ausgelegten Lüftung abgeführt und die verrauchte Zone auf ca. 100 m beschränkt. Die Zonen ohne bzw. mit bedingter Selbstrettung sind entsprechend beschränkt. (Abbildung 15).

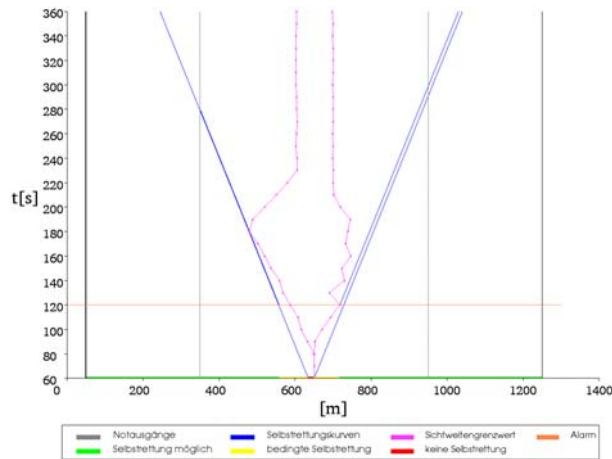


Abbildung 15: Selbstrettungsbereiche
30 MW Brand, RA, Stau

Bei reiner Längslüftung (Abbildung 16 und Abbildung 17) breitet sich der entstehende Rauch im Tunnel aus, wodurch im Staufall die Selbstrettung erschwert wird.

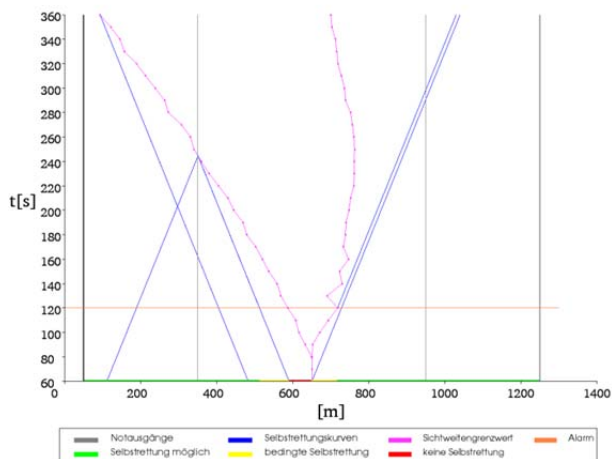


Abbildung 16: Selbstrettungsbereiche
30 MW Brand, LL ohne WN-BBA, Stau

Durch den Einsatz der WN-BBA wird dieser Effekt jedoch reduziert, da das Gesamtrauchvolumen geringer ist.

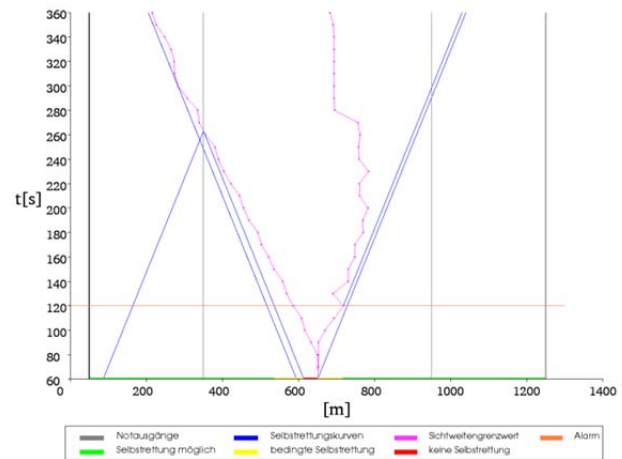


Abbildung 17: Selbstrettungsbereiche
30 MW Brand, LL + WN-BBA, Stau

5. Risikoermittlung und Bewertung

Mit den in Kapitel 4 dargestellten Ereignis- und Verteilungshäufigkeiten für die jeweiligen Szenarien und den ermittelten zugehörigen Schadenausmaßen werden die Risiken für die untersuchten Fälle des Modelltunnels ermittelt und bewertet.

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 Häufigkeitsausmaß-Diagrammen (HA-Diagrammen) aufgetragen. Der Schadenerwartungswert (EV) entspricht dabei der Fläche unter der Summenhäufigkeitskurve (siehe Leitfaden Kapitel 2.7).

Durch die vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte lassen sich die untersuchten Fälle hinsichtlich des erzielbaren Sicherheitsniveaus differenzieren.

5.1 Wirkung der WN-BBA bei reiner Längslüftung

In Abbildung 18 sind die Risikokurven für die reine Längslüftung (UF 1) ohne WN-BBA und den gleichen Fall mit einer zusätzlichen WN-BBA dargestellt. Bei der Betrachtung der kollektiven Risiken ergibt sich durch den Einsatz einer WN-BBA eine Erhöhung der Sicherheit für alle Brandereignisse um 3,4 %. Die kollektiven Risiken betragen im Einzelnen:

Schadenerwartungswert gesamt:

UF 1 (LL): $EV = 31,80 \cdot 10^{-3}$

UF 1 (LL + WN-BBA): $EV = 30,71 \cdot 10^{-3}$

$\Delta = -3,4\%$

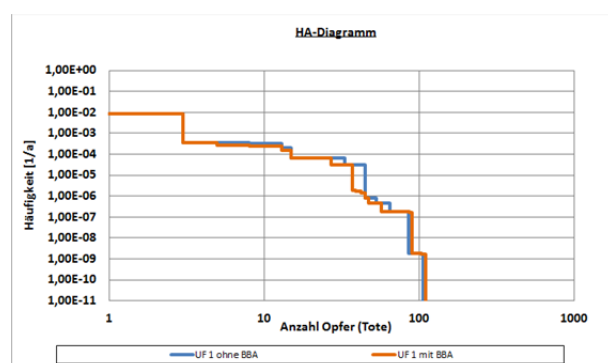


Abbildung 18: HA- Diagramm, Untersuchungsfall 1, Gesamtrisiko

Eine differenzierte Betrachtung nach 30 MW und 100 MW Bränden erfolgt in den folgenden Diagrammen (30 MW: Abbildung 19, 100 MW: Abbildung 20)

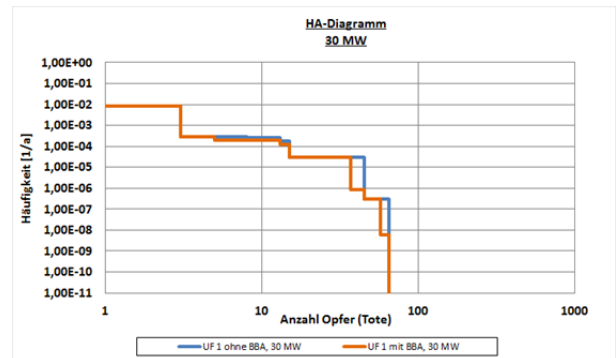


Abbildung 19: HA-Diagramm, Untersuchungsfall 1, 30 MW Brand

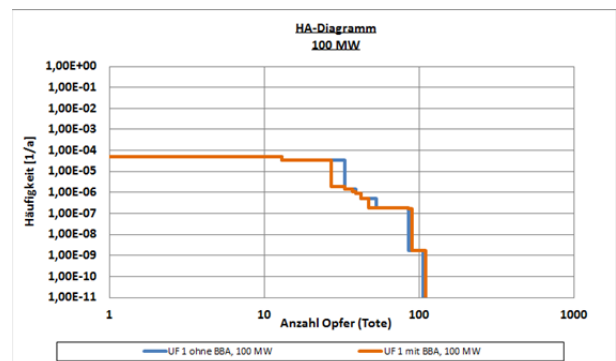


Abbildung 20: HA- Diagramm, Untersuchungsfall 1, 100 MW Brand

Der unterschiedliche Verlauf der Häufigkeitsausmaß-Kurven zeigt zum einen die sehr viel geringere Häufigkeit von 100 MW Bränden gegenüber 30 MW Bränden, zum anderen das höhere Schadensausmaß bei den großen Bränden. Die kollektiven Risiken, getrennt nach den großen Brandereignissen sind im Folgenden zusammengestellt:

Schadenerwartungswert 30 MW:

UF 1 (LL): $EV = 29,97 \cdot 10^{-3}$

UF 1 (LL + WN- BBA): $EV = 29,11 \cdot 10^{-3}$

$\Delta = -2,9\%$

Schadenerwartungswert 100 MW:

UF 1 (LL): $EV = 1,41 \cdot 10^{-3}$

UF 1 (LL + WN-BBA): $EV = 1,21 \cdot 10^{-3}$

$\Delta = -14,4\%$

Der Schadenerwartungswert wird um annähernd 3 % für alle 30 MW Brandszenarien günstiger. Die singuläre Betrachtung der 100 MW Brände zeigt, dass hier durch die WN-BBA eine deutliche Senkung des Risikos (-14,4 %) erreicht werden kann.

5.2 Kompensation einer Rauchabsaugung über Zwischendecke

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der Risikoermittlung für den Referenzfall und den Untersuchungsfall (UF 1) vergleichend gegenüber gestellt. Die Ergebnisse der Häufigkeitsausmaßermittlung

infolge eines 5 MW, 30 MW und 100 MW Brandes sind dazu überlagert worden. Die dargestellten Summenhäufigkeitslinien repräsentieren somit das zu erwartende Gesamtrisiko pro Tunnelröhre.

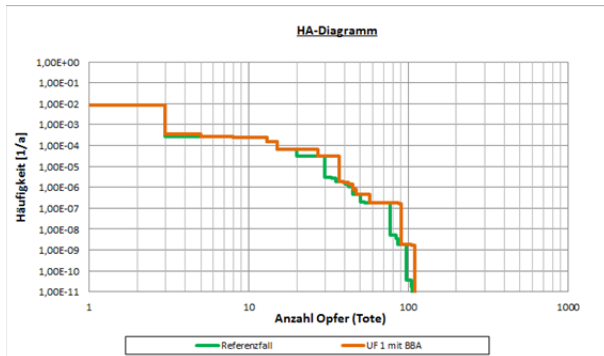


Abbildung 21: HA-Diagramm, Maßnahmenvergleich zw. Referenzfall und Untersuchungsfall 1

Schadenerwartungswert gesamt:

$$\begin{aligned}\text{Referenzfall (LL+RA): } EV &= 30,04 \cdot 10^{-3} \\ \text{UF 1 (LL + WN- BBA): } EV &= 30,71 \cdot 10^{-3} \\ \Delta &= +2,2\%\end{aligned}$$

Bezogen auf den richtliniengerecht ausgestatteten Modelltunnel im Referenzfall mit kombinierter Längslüftung und Rauchabsaugung weist der Modelltunnel nach Abbildung 21 im Untersuchungsfall 1 ein um 2,2 % höheres Sicherheitsniveau auf.

Der Untersuchungsfall mit WN-BBA liegt somit auf einem ähnlichen Sicherheitsniveau wie der Referenzfall, wobei der Zahlenwert geringfügig auf der ungünstigeren Seite liegt. Erfahrungsgemäß können bei Unterschieden bis ca. 2 % keine verbindlichen Aussagen zu einer Reihenfolge getroffen werden, da aufgrund von Unschärfen bei den Eingangsdaten und den Annahmen Streuungen in diesem Rahmen üblich sind.

5.3 Plausibilitätsprüfung der Bewertung

Für eine abschließende Bewertung der berechneten Risiken sind neben den genannten Unschärfen weitere Aspekte relevant. Um die durchgeführten Risikoanalysen für die spezifische Aufgabenstellung korrekt zu bewerten, sind die folgenden Aspekte zu beleuchten.

Methodik der Risikoanalyse

Für die quantitative Berechnung von Risiken ist eine Methodik anzuwenden, mit der die risikorelevanten Abläufe der Ereignisse mit der Funktion von sicherheitswirksamen Maßnahmen abgebildet werden können. Da nicht alle möglichen Szenarien, Orte, Abläufe etc. abbildbar sind, sind vereinfachende Modelle (Fluchtmodelle, Brandmodelle etc.) anzuwenden. Ziel ist es mit dem Mindestmaß an Aufwand und damit Ressourcen verlässliche

Aussagen hinsichtlich des Sicherheitsniveaus zu erhalten. Dazu ist im Regelfall die Beschränkung auf maßgebliche Szenarien bzw. Bemessungsfälle sinnvoll.

Verfahren nach Heft 66

In Deutschland werden quantitative Risikoanalysen nach dem Verfahren zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln gemäß Heft 66 [BAS 2009] zur Begrenzung des Aufwandes auf Basis von Lachenbränden, also sich schnell entwickelnden Flüssigkeitsbränden, durchgeführt. Der Hintergrund für dieses Vorgehen ist wie folgt:

- Je schneller ein Brandablauf ist, desto ungünstiger sind die Fluchtbedingungen in der Selbstrettungsphase
- Bisher zu beurteilende betriebs-, verkehrs- oder sicherheitstechnische Maßnahmen nach [EG 2004] und [RAB 2006] dienen ausschließlich der positiven Beeinflussung von Fluchtbedingungen für die Tunnelnutzer. Dies sind z. B.:
 - Anzahl der Notausgänge: Verkürzung der Fluchtwege und damit der Verweildauer von Tunnelnutzern in verrauchten Abschnitten.
 - Brandnotlüftung: Lenkung bzw. Absaugung von Rauchgasen, um Fluchtwege und Aufenthaltsbereiche raucharm zu halten.
 - Optische Rauchdetektion: Verkürzung der Zeit zwischen Brandausbruch und Branderkennung, um die Zeitspanne bis zur Wirkung von technischen Maßnahmen wie Tunnel-sperrung oder Fluchtaufforderung über Lautsprecher zu verkürzen.
- Die betrachteten Maßnahmen nehmen keinen bzw. nur geringen Einfluss⁴ auf den Brandverlauf.

Die reduzierte Betrachtung des Lachenbrands ist als Bemessungsfall für die Betrachtung der Personenrisiken von Tunnelnutzern sinnvoll, da mit der Wahl des ungünstigsten Falls ein maximales Schadenausmaß der Bewertung dient. Bei der Betrachtung anders verlaufender Initialereignisse, wie z. B. ein sich im Vergleich zu einem Flüssigkeitsbrand langsamer entwickelnder Feststoffbrand, sind die Brandverläufe dieses Initialereignisses hinsichtlich Flashover oder Rauchgasdurchzündung für verschiedene Ausstattungsvarianten gleich und spielen daher bei der vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Ausstattungen nur eine untergeordnete Rolle.

⁴ Ein Einfluss ist hier ggf. in geringem Umfang durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten einer Längslüftung möglich.

Veränderte Eingangsgröße durch WN-BBA

Bei der Bewertung der Wirksamkeit einer WN-BBA als eine mögliche technische Maßnahme sind weitere Eigenschaften bei der Wahl zu betrachtender Szenarien gem. Abbildung 1 wesentlich. Diese betreffen den Einfluss einer WN-BBA auf:

- die Brandentwicklung in der Entstehungsphase
- das Brandgeschehen in der Vollbrandphase
- die Verhinderung oder Verzögerung eines Flashovers
- die Verhinderung eines Flashovers auf nah stehende Fahrzeuge
- Verhinderung einer Rauchgasdurchzündung mit Brandübergreif auf z. T. weit entfernte Fahrzeuge

Der o. g. Einfluss auf das Brandgeschehen spielt bei Bränden infolge technischen Defekts bzw. Kollision mit Brand z. B. durch einen Kurzschluss eine besonders große Rolle. In Verbindung mit einer frühzeitigen Detektion sind hier hohe Sicherheitspotenziale aktivierbar, die mit dem aktuell angewendeten Verfahren nach Heft 66 nicht dargestellt werden können. Insbesondere wird dies infolge der Häufigkeitsverteilung von schnell ablaufenden Lachenbränden und sich verzögert entwickelnden Feststoffbränden relevant (s. Tabelle 3)

Zur Abschätzung, wie eine geringfügige Veränderung der Brandgrößenverteilung durch eine WN-BBA auf das Risiko wirkt, wird die Häufigkeits-Ausmaßverteilung für den Fall „Kompensation einer Rauchabsaugung über Zwischendecke durch eine WN-BBA in der Abbildung 22 modifiziert. Dabei wird angenommen, dass

- 10 % aller 30 MW Brände durch die WN-BBA auf 5 MW begrenzt werden
- 20 % aller 100 MW Brände durch die WN-BBA auf 30 MW begrenzt werden

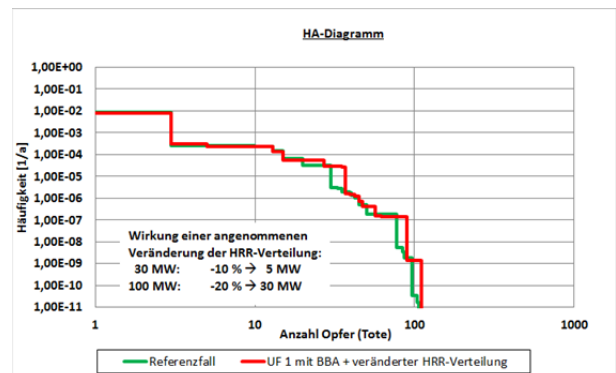


Abbildung 22: HA- Diagramm, abgeänderte Verteilung der Brandleistung

Brände ohne Beteiligung von Gefahrgütern nach ADR	Brandrate* [Brände / (km·a)]		Häufigkeitsverteilung	Beispielhafte Ursache	Häufigkeit (Annahme)	Charakteristik des Brandverlaufs
Brände infolge technischem Defekt	3,68E-09	3,00E-09	81,5%	Bremsen überhitzt Reifenbrand Kabelbrand Turbolader überhitzt	100%	
Brände infolge Kollision		6,84E-10	18,6%	Kurzschlüsse im Motorraum spontan auslaufende Betriebsflüssigkeiten (Benzin, Öl) die sich z. B. an heißen Fahrzeugteilen entzünden	überwiegend sehr selten	

*für RV-Tunnel ohne Zu- und Abfahrten nach [BAS 2009]

Tabelle 3:
Übersicht über die Häufigkeit von Brandverläufen bezogen auf die Ursachen

Mit dieser konservativen Annahme ergeben sich folgende Schadenerwartungswerte:

Schadenerwartungswert gesamt:

UF 1: $EV = 30,71 \cdot 10^{-3}$

UF 1 mit WN-BBA und variiertem HRR:

$EV = 27,58 \cdot 10^{-3}$

$\Delta = -8,2\%$

Folglich kann bei der vorliegenden vereinfachten Betrachtung eine Rauchabsaugung über Zwischendecke durch eine reine Längslüftung mit zusätzlicher WN-BBA nicht nur kompensiert, sondern die Sicherheit um über 8 % gesteigert werden.

Fazit

Die Bewertung der Wirksamkeit von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln hinsichtlich der Risikominderung für die Tunnelnutzer erfordert einen deutlich erweiterten Untersuchungsumfang im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik. Dabei sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Betrachtung von häufigen Brandereignissen mit verzögertem Brandverlauf
- Betrachtung von Flashover und Rauchgasdurchzündung, durch die eine Ausweitung des Brandes auf weitere Fahrzeuge abgebildet wird
- Wahl eines Fluchtmodells mit realitätsnahem Fluchtverhalten

6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchung wurde mittels einer quantitativen Risikoanalyse ein Vergleich des Sicherheitsniveaus eines Modelltunnels bei Ausstattung mit und ohne Wassernebel-Brand-bekämpfungsanlage gezogen.

Zur Darstellung des Kompensationspotentials wurde zum einen ein Referenzfall mit Rauchabsaugung über eine Zwischendecke und zum anderen ein Untersuchungsfall 1 mit reiner Längslüftung und einer WN-BBA betrachtet. Des Weiteren wurde das Risiko der Tunnelnutzer bei einer Längslüftung ohne und mit zusätzlicher WN-BBA bestimmt und gegenübergestellt.

Die quantitativen Risikoanalysen wurden nach aktuellem Stand der Technik auf Basis des Hefts 66 der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt, wobei ausschließlich selten vorkommende schnell ablaufende Lachenbrände als Brandereignis betrachtet werden.

Die positive Wirkung einer zusätzlichen WN-BBA in einem mit reiner Längslüftung ausgestatteten Richtungsverkehrstunneln konnte nachgewiesen werden, das kollektive Risiko verbesserte sich um 3,4 %.

Die Betrachtung, inwiefern eine Rauchabsaugung über eine Zwischendecke mit Rauchabzugsklappen durch eine reine Längslüftung mit zusätzlicher BBA kompensiert werden kann, führt zu dem Ergebnis, dass die Sicherheit für beide Systeme auf einem vergleichbaren Niveau liegen. Dabei liegt rein rechnerisch das Ergebnis mit Kompensation geringfügig auf der unsicheren Seite, dies jedoch in einer Größenordnung, die erfahrungsgemäß im Bereich der Unschärfen der Eingangswerte liegt.

Dabei ist zu beachten, dass die betrachteten Brandszenarien für Ausstattungsvarianten ohne Einfluss auf den Brandverlauf für einen Vergleich sehr gut geeignet sind. Das Potenzial einer WN-BBA, die häufigen verzögerten Brandverläufe deutlich zu reduzieren und Übergriffe auf nah und weit entfernte Fahrzeuge zu verhindern, kann damit jedoch nicht erfasst werden. Für einen objektiven Vergleich des Sicherheitsniveaus von Tunneln mit WN-BBA und ohne WN-BBA sind daher zusätzliche Brandereignisse und -szenarien zu betrachten. Ebenso ist hier die Abbildung eines realistischen Fluchtverhaltens zwingend erforderlich.

Könnte in dem vorliegenden Beispiel mit schnell ablaufenden Lachenbränden ein vergleichbares Sicherheitsniveau bei der Kompensation einer Rauchabsaugung durch eine WN-BBA gezeigt werden, werden die Ergebnisse bei einer weiteren Szenarienbetrachtung erheblich besser ausfallen.

7. Quellenverzeichnis

7.1 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.

7.2 Literatur

- [BAL 2003] Baltzer W., Mayer G.: Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln; Forschung und Praxis, Bd. 40, Bauverlag BV 2003
- [BAL 2008] Baltzer, Mayer, Zimmermann, Zulauf; Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln; Entwurf BAST 2008
- [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
- [EG 2004] 2004/54/EG: Richtlinie des europäischen Parlaments über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz, Aktuelle Ausgabe 2004
- [MAY 2006] Mayer, G.; Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstretungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation; Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, 2006
- [RAB 2006] RABT: „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“, Aktuelle Ausgabe: 2006
- [ZTV 2010] ZTV – ING: „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“, Aktuelle Ausgabe: 2010