

**Bewertung der
Sicherheit von
Straßentunneln**

**Überprüfung der
Annahmen und
Parameter für
Risikoanalysen**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 183

bast

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

von

Bernhard Kohl
Harald Kammerer
Oliver Heger

ILF Consulting Engineers Austria GmbH
Linz

Georg Mayer
Sven Brennberger

BUNG Ingenieure AG
Stuttgart

Christoph Zulauf
Peter Locher

EBP Schweiz AG
Zürich

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 183

bast

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

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

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

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

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

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

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0663
Überprüfung der Annahmen und Parameter
für Risikoanalysen für Straßentunnel

Fachbetreuung
Christof Sistenich

Referat
Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb,
Zivile Sicherheit

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-711-2

Bergisch Gladbach, Oktober 2022

Kurzfassung – Abstract

Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

Mit der Einführung der RABT 2006 bzw. der Veröffentlichung der EABT 2019 werden die Vorgaben in der EU-Richtlinie 2004/54/EG zur Anwendung von Risikoanalysen bei der Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln in das nationale Regelwerk überführt. Danach werden Risikoanalysen erforderlich, wenn ein Straßentunnel entweder eine besondere Charakteristik aufweist oder in seiner geometrischen Ausbildung bzw. sicherheitstechnischen Ausstattung von den Vorgaben im Regelwerk abweicht.

Seit der Veröffentlichung der aktuellen Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln gemäß BASt-Heft B66 „Sicherheitsbewertung von Straßentunneln“ im Jahr 2009 liegen zwischenzeitlich umfangreiche Erkenntnisse bei der Umsetzung des Verfahrens und der praktischen Anwendung in risikoanalytischen Untersuchungen vor. Des Weiteren wurden in dem Fachbereich zahlreiche Forschungsprojekte zu speziellen Fragestellungen durchgeführt und wesentliche neue Erkenntnisse zu bisher unberücksichtigten Parametern gewonnen. Sowohl das methodische Vorgehen als auch grundlegende Parameter und Annahmen der Methodik entsprechen daher nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Aus den oben genannten Gründen ist es erforderlich, die Bewertungsmethodik zu analysieren und zweckmäßige Anpassungsvorschläge festzulegen.

Der entwickelte Anpassungsvorschlag für die Bewertungsmethodik behandelt die folgenden Anpassungen im Zuge der Risikobewertung, der Häufigkeitsermittlung, sowie der Schadensausmaßermittlung für Kollisionen und Brände im Tunnel.

Zur Risikobewertung wurde anstelle des absoluten Bewertungskriteriums innerhalb von Summenkurven im Häufigkeits-Ausmaßdiagramm ein relativer Ansatz implementiert, bei dem ein zu untersuchender Tunnel einem richtlinienkonformen theoretischen Tunnel gegenübergestellt wird. Dafür war es erforderlich die Rahmenbedingungen für die Festlegung eines solchen Referenztunnels für wesentliche Tunnelparameter zu definieren.

Der Anpassungsvorschlag in der Häufigkeitsanalyse beinhaltet die Aktualisierung von Ereignisraten (Unfallrate, Brandrate) aufgrund von aktuellen Auswertungen der bundesweiten Ereignisdatenbank, der Festlegung von Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit im Tunnel, sowie eines Vorschlages zur Aktualisierung der Struktur des Ereignisbaumes inklusive dessen relativen Häufigkeiten.

Der Anpassungsvorschlag für das Schadensausmaßmodell beinhaltet Neuerungen sowohl bei der Analyse der Auswirkungen von Kollisionen, als auch von Bränden im Tunnel. Mit Hilfe des Nilsson Power Modells kann fortan der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Schadensausmaß nach Kollisionen abgebildet werden. Außerdem wurden für Wirkungsmodelle zur Abschätzung von Brandfolgen entsprechende Parameter und Randbedingungen festgelegt. Fokus dabei war die Festlegung von detaillierten Brandkurven und der zugehörigen Zeitschiene, die Implementierung eines akkumulationsbasierten Fluchtmodells sowie Ansätze zur realitätsnahen Abbildung von Selbst- und Fremdreteungsvorgängen.

Der ganzheitliche Anpassungsvorschlag basiert auf einer aktuellen Auswertung der Tunnelereignisse in Deutschland sowie dem Stand der Wissenschaft und Technik bei der Bewertung von Personenrisiken im Tunnel. Durch Implementierung der vorgeschlagenen Anpassungen ist es fortan möglich, die Risiken im Tunnel realitätsnaher zu analysieren und eine Vielzahl von Sicherheitsmaßnahmen besser zu bewerten.

Assessing the safety of road tunnels – review of assumptions and parameters for performing risk analyses

With the introduction of the RABT 2006 and the publication of the EABT 2019, the requirements of the EC-Directive 2004/54/EC on the use of risk analyses when assessing the safety of road tunnels was transferred to the national regulations. According to this, risk analyses are required if a road tunnel either has special characteristics or deviates from the specifications in the regulations in terms of its geometric design or safety-related equipment.

Since the publication of the current methodology for the safety assessment of road tunnels in accordance with BAST-booklet B66 “Sicherheitsbewertung von Straßentunneln” in 2009, extensive knowledge has now been gained in the implementation of the procedure and its practical application in risk analysis studies. In addition, numerous research projects on special issues were carried out and essential new findings were made on parameters that were previously not taken into account. Both, the methodological approach and the basic parameters and assumptions of the method are therefore no longer in line with the current state of the art. For the reasons mentioned above, it is necessary to analyze the methodology and to propose appropriate adaptations.

The adaptation proposal developed for the methodology deals with adaptations in the course of risk evaluation, the frequency analysis, as well as the analysis of the consequences of tunnel collisions and fires.

For risk evaluation, instead of the absolute criterion within FN-curves, a relative approach was implemented in which a tunnel to be examined is compared with to a guideline-compliant theoretical tunnel. For this it was necessary to define the framework conditions for the definition of such a reference tunnel.

The adaptation proposal in the frequency analysis includes the updating of event rates (collision rate, fire rate) based on current evaluations of the nationwide event database, the definition of influencing factors on the accident frequency in tunnels, as well as a proposal for updating the structure of the event tree including its relative frequencies.

The adaptation proposal for the consequence model includes innovations both in the analysis of the effects of collisions and fires in tunnels. With the help of the Nilsson Power Model, the influence of speed on the consequences after collisions can now be evaluated. In addition, corresponding parameters and boundary conditions were specified for impact models for estimating the consequences of a tunnel fire. The focus was on the definition of detailed fire curves and the associated timeline, the implementation of an accumulation-based egress model as well as approaches for the realistic mapping of self-rescue and external rescue processes by emergency services.

The holistic adaptation proposal is based on a current evaluation of the tunnel events in Germany as well as the state of the art in the assessment of personal risks in the tunnel. By implementing the proposed adjustments, it is now possible to analyze the risks in the tunnel more realistically and to better evaluate a large number of safety measures.

Summary

Assessing the safety of road tunnels – review of assumptions and parameters for performing risk analyses

1 Background and objectives

With the introduction of the RABT 2006 and the publication of the EABT 2019, the requirements of the EC-Directive 2004/54/EC on the use of risk analyses when assessing the safety of road tunnels was transferred to the national regulations. According to this, risk analyses are required if a road tunnel either has special characteristics or deviates from the specifications in the regulations in terms of its geometric design or safety-related equipment.

The required depth of risk analyses (qualitative/quantitative) as well as the verification of whether there is a special characteristic and/or a significant deviation from guidelines is to be determined on the basis of the procedure described in the „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006“. The methodology for carrying out quantitative risk analyzes is described in the BASt-booklet B66 “Sicherheitsbewertung von Straßentunneln”.

Since its publication in 2009, extensive knowledge has now been gained in the implementation of the procedure and its practical application in risk analysis studies. In addition, numerous research projects on special issues were carried out and significant new findings were made on parameters that were previously not taken into account. Among other things, the underlying accident statistics (event database) have been updated in the meantime and provide additional information on the frequencies of collisions and fires in road tunnels.

Both the methodological approach and the basic parameters and assumptions of the method are therefore no longer in line with the current state of the art. For the reasons mentioned above, it is necessary to analyze the currently valid methodology for the safety assessment of road tunnels and to define appropriate adaptation proposals.

For this purpose, in a first step, new statistical bases were collected, accident rates were updated and

influencing factors were determined. In addition, previously used input parameters and assumptions of the methodology, which affect the tunnel safety level as a whole as well as individual equipment features, were further completed, their influence on the risk was checked and adjusted.

In addition, the methodology was expanded to include parameters that were previously not taken into account. This includes, for example, the influence of speed on the accident rate and severity, fire development rates differentiated according to faster or delayed fire development, more detailed consideration of reaction times and human behavior during evacuation processes, the positive effects of external rescue, etc. From the investigation of the parameters mentioned with regard to their influence on risk, statements were made regarding the need to take them into account in risk-oriented studies in the future.

Another aim of the project was to improve the comparability of the results of risk-oriented individual investigations on safety-relevant equipment features in the road tunnel by standardizing the procedures.

When working on the project, it was essential to obtain a broad, as comprehensive as possible view of the experience in the implementation and application of the procedure. To ensure this, a wide range of participants from practice and science were addressed in a workshop in the beginning of the project.

2 Practical experience

The analysis of the existing methodology shows that the methodology is basically still suitable for assessing the safety of road tunnels and, thanks to its modular structure, is open to expansion. The fact that it does not focus on the use of special models guarantees a high degree of future viability.

In the last ten years, numerous different sets of rules have been developed or adapted in order to implement the requirements of the European directive. For the present research project, primarily the regulatory requirements of those countries were analyzed in-depth, in which the topic of tunnel safety is particularly important. The findings can be summarized as follows:

Degree of standardization

The current regulatory requirements or the established procedures for risk assessment in accordance with the requirements of EC Directive 2004/54/EC are (as expected) very different. Nonetheless, there are various methods that are comparable in terms of their basic principles. In comparison to the methods of other countries, which have been evaluated in depth, it shows that the method according to BASt booklet B66 allows more degrees of freedom in implementation. Other procedures make for individual elements or their model consideration more detailed specifications. Here the evaluations show a general area of tension as to which extent which specifications should be made for risk-based evaluations or which extent of freedom is allowed in the implementation. In the first case, the comparability between different practical applications and the traceability are increased, in the second case there are more possibilities to map specific tunnel properties that can be mapped less or not at all in highly formalized procedures.

Risk analysis/model parameters

In comparison to the method according to BASt booklet B66, some of the established methods take into account more/additional tunnel properties (design characteristics and measures) than direct influencing variables and parameter values; this includes, for example, an increased number of lanes or curve radii. There are also, in some cases, more pronounced specifications and notes on the parameter values to be used. Furthermore, more specific instructions and specifications for the modeling of event sequences and models are taken into account (e.g. behavior of tunnel users).

There are numerous investigations and studies on many influencing factors that can be used for implementation in the further development of the process in accordance with BASt booklet B66.

Risk evaluation

There is also considerable heterogeneity with regard to the criteria for risk assessment. While some procedures are based on comparative procedures with a reference tunnel (as is often the case in Germany today), others use absolute limit criteria relating to the level of safety or considerations of proportionality for any additional measures. There

are also procedures that use not only collective risks but also individual risks for tunnel users as an evaluation measure.

Complexity and effort

The majority of the procedures established today tend to be complex. For practical application, in-depth specialist knowledge in the field of road tunnels and risk-based procedures is required. Today there are software programs associated with several established processes that support implementation and thus reduce effort. However, even in these cases, the users have to be well acquainted with the methodological basics and have to bring in system knowledge of tunnels in order to model the respective tunnel properties and possible event sequences realistically.

3 Adaption proposal for the risk assessment methodology

The proposed adaptation for the assessment methodology is divided into the following chapters as follows:

1. Risk evaluation
2. Frequency analysis
3. Analysis of the consequences of tunnel collisions
4. Analysis of the consequences of tunnel fires

During the adjustments, special attention was paid at the procedural level to the following general properties in the application of the methodology:

- Flexibility in use
- Minimum required level of complexity and effort
- Transparency, traceability and comparability of the (interim) results
- Process-related comparability of risk-reducing measures

In addition, the effects of the proposed adaptations were examined intensively. The previous safety level of a tunnel according to the specifications in booklet B66 was compared with the calculations for a model tunnel, taking into account the new model parameters and evaluation approaches. The focus

is on the comparative approach to assess differences in risk. The extensive results are presented in detail in the final report.

3.1 Risk evaluation

According to the procedure according to booklet B66, it is proposed that the (collective) risks determined in the course of the risk assessment are shown in the form of cumulative curves in a FN-diagram using an absolute evaluation criterion to assess the acceptability. At the time of the development of the procedure according to booklet B66, however, it was foreseeable that it was not yet possible to establish an absolute acceptability criterion. For this reason, it was recommended that the risk assessment be carried out on the basis of a relative comparison between the planned case and the corresponding value for the theoretical case of a guideline-compliant design. As experience shows, this comparative assessment of the risks has largely become established in practice. However, practice has also shown that there is a need to sharpen the definitions with regard to the reference tunnel.

Basically, the reference tunnel is a theoretical tunnel that is similar to the real tunnel examined, but fully meets all requirements and conditions of the guidelines and regulations to be applied in the specific case. A relative assessment approach is pursued, in which compliance with the required safety level is provided by a relative comparison with this reference tunnel. By using a relative assessment approach, the influence of uncertainties on the assessment result can be minimized.

In the research project, specifications for the reference tunnel were specified for all safety parameters relevant according to RABT/EABT and compared with the tunnel to be examined. The focus was on setting parameters for the majority of tunnels in Germany. For tunnels that represent special cases, it is recommended that the reference tunnel be determined individually in coordination with the relevant decision-makers, depending on the objective of the investigation.

3.2 Frequency analysis

The adaptation proposal in the frequency analysis contains the findings from the evaluations of the

nationwide event database, the definition of influencing factors for the accident rate, as well as a proposal for updating the structure of the event tree.

The frequency of vehicle accidents and fires can be derived from long-term event statistics. In contrast to analytical methods, statistical methods are clearly in the focus here. The basis for the analysis is the nationwide event database, consisting of the basic data for each tunnel and the event report for each reportable event. The database includes 168 tunnels and approx. 49,000 events (2006 to 2020).

After extensive data processing, numerous parameters could be derived directly from the database. The primary focus was on checking the current event rates and, if necessary, updating them on the basis of new statistical data.

The analysis in the research project showed that the values from the BAST-booklet B66 for the (base) accident rate, the distribution of different accident types and the fire rate have to be updated. In addition to the new, updated values, the report includes a comparison with the values from BAST-booklet B66 and a comparison with event rates from other countries.

However, accidents in road tunnels are influenced by numerous geometric and traffic factors. It is therefore necessary to include these influencing factors when determining the frequency of accidents. For this purpose, corresponding correction factors for unidirectional and bidirectional road tunnels were determined, which are multiplied with the respective base accident rate.

Accident rates derived from the event database, as well as expert estimates and comparison with approaches from other risk models, form the basis for this factor model. Correction factors could be determined for the following influences:

- Existence of entrances/exits (f_{ZA})
- tunnel length (f_L)
- Number of traffic lanes (f_{FS})
- Traffic lane width (f_{FSB})
- Existence of break down lane (f_{SS})
- Traffic volume per lane ($f_{DTV/FS}$)
- Permissible speed (f_V)
- Differential speed ($f_{\Delta V}$)

To determine the frequency, all possible intermediate states up to the end states of the system are determined from a triggering event and these are quantified with regard to their expected frequency. The intermediate states are examined for system responses in the same way as those of the triggering event. In this way, until a final state is reached, different branches of the event sequence are created, which are provided with different branch probabilities.

The following branches are provided for mapping fire incidents within the event sequence:

- Event location (e.g. entrance area/inner tunnel section/center of the tunnel...)
- Traffic volume (day/night/...)
- Traffic status (free traffic/traffic jam)
- Fire load (5/30/100 MW)
- Fire development (fast/delayed)
- Detection successful (yes/no)
- Alerting tunnel users successful (yes/no)
- Tunnel closure systems activated (yes/no)
- Ventilation system activated (yes/no)
- Other security systems available and activated (yes/no)
- Increased damage extent (yes/no)
- Start of external rescue measures

The report specifies standard values for the relative frequencies of the individual branches and explains specific differences to BAsT-booklet B66.

3.3 Consequence analysis

3.3.1 Tunnel collisions

In addition to the accident rate, the speeds driven in the tunnel also have an impact on the resulting extent of damage in the event of a collision. Since no meaningful relationships could be derived from the event database, the influence was justified with the help of the Nilsson Power Model. This is based on the direct relationship between the change in mean speed and the resulting change in the severity of the accident.

The different influence of the speed on these two sub-areas and also on the frequency of accidents with different degrees of severity is represented by the numerical value of the exponent. It is therefore recommended to model the extent of damage for collisions with the exponent 1, also due to the good agreement with the statistically proven dependencies.

3.3.2 Tunnel fires

In the event of a fire inside a road tunnel, road users can be endangered as a result of the effects of smoke particles, heat and toxic fire gases. High concentrations of smoke particles lead to restricted visibility and irritation of the respiratory tract and eyes, and thus hinder users in their orientation and movement. In order to be able to take these effects into account when determining the extent of the damage, a simulation model is required that enables the time and space-discrete calculation of the heat and material propagation depending on the development of the fire and fluid-mechanical boundary conditions.

For the computer programs (CFD models) suitable for this purpose, essential parameters and boundary conditions were specified in the adaptation proposal in order to determine the impact models for estimating the consequences of fire. Approaches for simulating the effects of smoke, the effects of toxic gases and the effects of heat were defined.

An essential part of the revision of the damage scale model concerns the discussion and, if necessary, the definition of a detailed timeline on which the model is based. The focus was primarily on the definition of fire curves and the associated energy and pollutant release rates. A major innovation is the implementation of a fast and a delayed fire curve, which makes it possible to evaluate additional measures that have a significant influence on the individual time steps. These measures include, for example, different behavior of detection devices, the reaction of operators, the activation of safety devices, the degree of compliance with tunnel closure systems and the reaction of tunnel users.

One of the biggest innovations in the revised methodology is the implementation of an accumulation-based escape model with the aim of mapping the effects of a tunnel fire on people fleeing as realistically as possible. The current risk model provides for the evaluation of a successful or

unsuccessful escape solely on the basis of visibility. By implementing intoxication models (based on the “Fractional Effective Dose” or “Fractional Effective Concentration”) it is possible to model variable escape speeds as a result of restricted visibility or high irritant gas concentrations.

Another focal point in the revision of the consequence model was the definition of model approaches and requirements for models to analyse self-rescue processes. Possibilities were created to evaluate different escape velocities, the perception of security facilities or dangers in the tunnel, incorrect behavior during the self-rescue and the influence of people with restricted mobility.

Approaches for evaluating external rescue were also implemented – both in firefighting and in rescuing people.

Inhalt

1	Ausgangslage und Hintergrund	13	7.1.4	Bewertungsgrundlage	28
2	Ziele des Forschungsvorhabens	13	7.2	Modellebene – Risikobewertung	29
3	Vorgehen und Arbeitsschritte	14	7.2.1	Verfahren gemäß Heft B66	29
4	Erfahrungen aus der Anwendung von Heft B66	15	7.2.2	Bisherige Umsetzung in der Praxis	29
4.1	Verfahrensebene	15	7.2.3	Weiterentwicklung des Risikobewertungsansatzes	30
4.2	Modellebene	15	7.3	Modellebene – Häufigkeitsermittlung	32
4.2.1	Methodisches Vorgehen	16	7.3.1	Erkenntnisse aus Auswertungen der Ereignisdatenbank	32
4.2.2	Modellannahmen und Parameter	17	7.3.2	Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit	45
4.2.3	Risikobewertung	18	7.3.3	Struktur des Ereignisbaumes/ Relative Häufigkeiten/Verzweigungen	49
4.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	18	7.4	Modellebene – Schadensausmaßermittlung Kollision	53
5	Risikobasierte Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln	19	7.5	Modellebene – Schadensausmaßermittlung Brand	54
5.1	Risikobasierte Sicherheitsbewertung	19	7.5.1	Simulationsmodelle	54
5.2	Anwendung im Kontext regulatorischer Vorgaben im Ausland	20	7.5.2	Wirkungsmodelle zur Abschätzung von Brandfolgen	54
5.2.1	Österreich	20	7.5.3	Zeitschiene	57
5.2.2	Schweiz	21	7.5.4	Selbstrettung	65
5.2.3	Niederlande	22	7.5.5	Fremdrettung	69
5.2.4	Frankreich	23	8	Prüfung der Auswirkungen des Adaptierungsvorschlages	70
5.3	Untersuchungen und Studien	24	8.1	Grundparameter	70
5.4	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen	25	8.2	Häufigkeitsermittlung	71
6	Ansätze für die Adaptierung der Bewertungsmethodik	25	8.2.1	Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis	71
7	Adaptierungsvorschlag für die Bewertungsmethodik	27	8.2.2	Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf	72
7.1	Verfahrensebene	27	8.3	Schadensausmaßermittlung	75
7.1.1	Allgemein	27	8.3.1	Schadensausmaße infolge Kollision	75
7.1.2	Anwendungsbereich und Erfordernis von vertieften Risikoanalysen	28	8.3.2	Schadensausmaße infolge Brand	75
7.1.3	Resilienzaspekte	28	8.4	Risikoermittlung	75
			8.5	Risikobewertung	76

8.5.1 Vergleich Referenz tunnel nach Heft B66 – Adaptierungsvorschlag ohne Fremdrettungseinfluss.	76	
8.5.2 Vergleich Referenz tunnel nach Heft B66 – Adaptierungsvorschlag mit Fremdrettungseinfluss	78	
9 Zusammenfassender Vorschlag für die Fortschreibung der Bewertungsmethodik.	80	
9.1 Weiterentwicklung auf Modellebene. . .	80	
9.1.1 Maßgebliche Szenarien	80	
9.1.2 Initialereignishäufigkeiten.	80	
9.1.3 Ereignisablauf/Struktur Ereignisbaum	83	
9.1.4 Schadensausmaßermittlung – Kollision (ohne Brand)	85	
9.1.5 Schadensausmaßermittlung – Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR	85	
9.1.6 Risikobewertung.	88	
9.2 Weiterentwicklung auf Verfahrensebene	90	
9.2.1 Grundlagen und Ereignisdaten.	90	
9.2.2 Fortschreibung Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln.	91	
9.2.3 Sammeln und Auswertung von praktischen Anwendungserfahrungen	91	
Literatur.	92	
Tabellen	93	
Bilder	95	
		Anhang
		A1. Risikobasierte Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
		A2. Einfluss von Tunnelmerkmalen auf die Fahrzeugunfallrate
		A3. Auswertungen nach der Unfallschwere
		Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter https://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.

1 Ausgangslage und Hintergrund

Mit der Einführung der RABT 2006 [2] bzw. der Veröffentlichung der EABT 2019 [3] werden die Vorgaben in der EU-Richtlinie 2004/54/EG [1] zur Anwendung von Risikoanalysen bei der Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln in das nationale Regelwerk überführt. Danach werden Risikoanalysen erforderlich, wenn ein Straßentunnel entweder eine besondere Charakteristik aufweist oder in seiner geometrischen Ausbildung bzw. sicherheitstechnischen Ausstattung von den Vorgaben im Regelwerk abweicht. Des Weiteren ist die Wahl des Lüftungssystems für Gegenverkehrstunnel bzw. Richtungsverkehrstunnel mit hoher Stauneigung mit einer Länge zwischen 600 m und 1.200 m risikooanalytisch zu begründen.

Der hierzu erforderliche Analysetiefgang (qualitativ/quantitativ) sowie die Überprüfung, ob eine besondere Charakteristik und/oder eine signifikante Abweichung vom Regelwerk vorliegt, ist auf Basis des im „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006“ [4] beschriebenen Verfahrens zu ermitteln. Die Methodik zur Durchführung quantitativer Risikoanalysen ist in der Schriftenreihe der BAST, Heft B66 „Sicherheitsbewertung von Straßentunneln“ [5] beschrieben und allgemein zugänglich.

Seit der Veröffentlichung im Jahr 2009 konnten umfangreiche Erkenntnisse bei der Umsetzung des Verfahrens und der praktischen Anwendung in risikooanalytischen Untersuchungen gesammelt werden. Des Weiteren wurden in dem Fachbereich zahlreiche Forschungsprojekte zu speziellen Fragestellungen durchgeführt und wesentliche neue Erkenntnisse zu bisher unberücksichtigten Parametern gewonnen. Unter anderem wurde die zugrundeliegende Unfallstatistik (Ereignisdatenbank) weitergeführt, aus der zusätzliche Informationen zu Eintrittshäufigkeiten und Hintergründen von Kollisionen und Bränden in Straßentunneln zu entnehmen sind. Auch haben sich hinsichtlich der Zusammensetzung des Fahrzeugflotte in den letzten mehr als zehn Jahren Verschiebungen durch Zunahme von neuen, alternativen Antriebstechnologien ergeben.

Sowohl das methodische Vorgehen als auch grundlegende Parameter und Annahmen der Methodik entsprechen daher möglicherweise nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik. Aus den oben genannt

ten Gründen ist es erforderlich, die aktuelle Bewertungsmethodik der Sicherheit von Straßentunneln zu analysieren und gegebenenfalls zweckmäßige Anpassungsvorschläge zu entwickeln.

Der gegenständliche Bericht fasst die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben FE 15.0663/2019/ERB zusammen. Fußend auf den Erfahrungen aus der Anwendung der in [5] beschriebenen Methodik und ergänzt um den aktualisierten Stand der Wissenschaft und Technik bei der Durchführung risikobasierter Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln wird in diesem Bericht ein Vorschlag für die Fortschreibung und Anpassung der Bewertungsmethodik formuliert.

2 Ziele des Forschungsvorhabens

Das grundlegende Ziel der Untersuchung war es, die aktuell gültige Methodik zur Sicherheitsbewertung von Straßentunneln [5] zu analysieren, Anpassungsvorschläge aufzuzeigen, deren Auswirkungen zu überprüfen und in einem Vorschlag zur Fortschreibung der Methodik festzulegen.

Dafür wurden in einem ersten Schritt neue statistische Grundlagen gesammelt und Unfallkennzahlen aktualisiert und Einflussfaktoren festgelegt. Außerdem wurden bisher verwendete Eingangsparameter und Annahmen der Methodik, die auf das Tunnelsicherheitsniveau insgesamt als auch auf einzelne Ausstattungsmerkmale einwirken, weiter vervollständigt, ihr Einfluss auf das Risiko überprüft und angepasst.

Im Weiteren wurde die Methodik um bisher unberücksichtigte Parameter erweitert. Hierzu zählt beispielsweise der Geschwindigkeitseinfluss auf Unfallrate und -schwere, Brandentwicklungsraten differenziert nach schnellerer bzw. verzögerter Brandentwicklung, die detailliertere Berücksichtigung von Reaktionszeiten, das menschliche Verhalten bei Evakuierungsvorgängen, die positiven Effekte von Fremdreitung, usw. Aus der Untersuchung der genannten Parameter bezüglich ihres Risikoeinflusses wurden Aussagen hinsichtlich der Notwendigkeit ihrer zukünftigen Berücksichtigung in risikoorientierten Untersuchungen abgeleitet.

Ein weiteres Ziel des Vorhabens bestand darin, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse risikoorientierter Einzeluntersuchungen zu sicherheitsrelevanten

Ausstattungsmerkmalen im Straßentunnel durch eine Vereinheitlichung der Prozeduren zu verbessern.

Wesentlich bei der Bearbeitung des Vorhabens war, eine breite, möglichst umfassende Sicht auf die Erfahrungen in Umsetzung und Anwendung des Verfahrens zu erlangen. Um dies zu gewährleisten, wurde ein breites Feld an Beteiligten aus Praxis und Wissenschaft im Zuge eines Fachworkshops angesprochen. Der Fachworkshop umfasste die folgenden Ziele:

- Sammlung der Erfahrungen bei der Umsetzung des Verfahrens und der Anwendung in risikoanalytischen Untersuchungen
- Identifikation der Bedürfnisse und des nutzerspezifischen Weiterentwicklungsbedarfs zum Verfahren und den zugrunde liegenden methodischen Elementen (Parameter, Datengrundlagen etc.)
- Identifikation von Handlungsfeldern sowie maßgeblichen, zu berücksichtigenden Entwicklungen seit der Publikation des Verfahrens (z. B. Verfügbarkeit neuer Daten)
- Bewertung und Priorisierung etwaiger Weiterentwicklungsmöglichkeiten des Verfahrens auf der Umsetzungsebene wie auch auf der Modellebene

Außerdem wurden regulatorische Vorgaben und Methoden zur risikobasierten Untersuchung von Straßentunnel im angrenzenden Ausland im Detail analysiert und wesentliche Ansätze identifiziert.

3 Vorgehen und Arbeitsschritte

Im Folgenden wird einerseits die inhaltliche Strukturierung und andererseits die Vorgehensweise des vorgeschlagenen methodischen Bearbeitungsansatzes des Gesamtvorhabens kurz erläutert.

- Im Arbeitspaket 1 wurde der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik für Risikoanalysen von Straßentunneln erhoben und im Hinblick auf die Zielsetzungen und Aufgabenstellung des gegenständlichen Projekts ausgewertet.
- Dies bildet den Hintergrund für eine kritische Analyse der aktuellen deutschen Risikoanalyse-

methodik in Arbeitspaket 2. Ein besonderer Schwerpunkt wurde hierbei auf die vielfältigen Praxiserfahrungen in der Anwendung von quantitativen Tunnelrisikoanalysemethoden gelegt. Zu diesem Zweck wurde in dieser Phase auch ein Workshop durchgeführt, mit Fokus auf den Blickwinkel der Endnutzer (Tunnelbetreiber, Anwender).

- In Arbeitspaket 3 wurden die Ergebnisse dieser Reflexionen in mögliche Ansätze für die Adaptierung der Risikoanalysemethodik umgesetzt. Diese Vorschläge wurden hinsichtlich ihrer Relevanz und Zweckmäßigkeit bewertet, um dadurch im Hinblick auf praxistaugliche Forschungsergebnisse eine Priorisierung vornehmen zu können.
- Darauf aufbauend wurde im Arbeitspaket 4 ein konkreter Adaptierungsvorschlag für die Bewertungsmethodik erarbeitet, der im Arbeitspaket 5 hinsichtlich seiner Auswirkungen auf die praktische Umsetzung überprüft wurde. Die Erkenntnisse dieses Prüfprozesses in Arbeitspaket 5 werden wiederum im Arbeitspaket 4 zurückgespiegelt, und dieser iterative Vorgang wird solange wiederholt, bis ein ausgereifter Vorschlag vorliegt.
- Der Adaptierungsvorschlag aus AP4/AP5 wird im Arbeitspaket 6 in einem finalen Vorschlag ausformuliert, begleitet von praktischen Umsetzungsvorschlägen.

Inhaltlich gliedert sich das methodische Vorgehen wie folgt in eine übergeordnete Betrachtungsebene (Verfahrensebene) und eine detaillierte Betrachtungsebene (Modellebene). Diese Struktur wird durchgängig auf alle Arbeitspakete von AP1 bis AP6 angewendet.

- Verfahrensebene
Auf dieser Ebene wird die Anwendung der Methodik in der Verwaltungspraxis und die sich aus der Fortschreibung des Regelwerks möglicherweise ergebende Ausweitung des Anwendungsbereichs diskutiert (EABT-80/100 (2019)) – einzelfallbezogener Nachweis eines gleichen Sicherheitsniveaus auch für größere Regelwerksabweichungen). Dabei wird zwischen der Anwendung für Bestandstunnel (Sanierungsfall) bzw. für Neubautunnel unterschieden und es wird auf Kosten-Nutzen-Effekte eingegangen.

- Modellebene
 - Hier werden 3 Bereiche getrennt untersucht:
 - Methodisches Vorgehen

Betrifft die strukturellen Elemente der Methodik, wie Ereignisbaum und Schadenausmaßmodelle für Unfälle und Brände.
 - Modellannahmen und -parameter

Betrifft Datengrundlagen und Parameter für die Quantifizierung der Modelle, wie Ereignisraten, relative Häufigkeiten im Ereignisbaum, Ansätze für die Quantifizierung von Maßnahmenwirkungen bzw. im Modellhintergrund hinterlegte Annahmen wie z. B. zeitliche Abläufe von Ereignisketten.
 - Ansatz für Risikobewertung

Hier werden Fragen der Risikoakzeptanz und des Vorgehens bei der Bewertung von zusätzlichen, risikomindernden Maßnahmen behandelt.

Bild 1 veranschaulicht das Vorgehen bei der Projektbearbeitung.

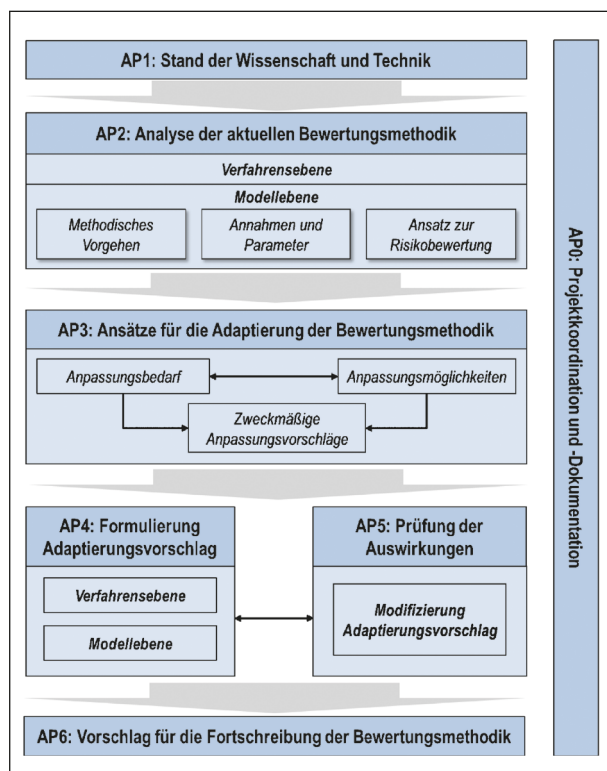


Bild 1: Arbeitsplan

4 Erfahrungen aus der Anwendung von Heft B66

4.1 Verfahrensebene

Das Verfahren zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln wird insbesondere zur Analyse und Bewertung von komplexen Aufgaben eingesetzt. Die Ergebnisse dienen als Entscheidungsgrundlage und Sicherheitsnachweis. Der hierzu notwendige Detaillierungsgrad lässt sich nicht über vereinfachte Modelle abbilden. Häufig wird das Verfahren notwendig, um herauszuarbeiten, durch welche Maßnahmen Abweichungen vom geforderten Sicherheitsniveau kompensiert werden können. Eine Überprüfung der Notwendigkeit von zusätzlichen Maßnahmen bei Vorliegen einer besonderen Charakteristik hat demgegenüber an Bedeutung verloren.

4.2 Modellebene

Das Verfahren zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln gemäß Heft B66 basiert auf der Methodik der quantitativen Risikoanalyse. Als Maß für die Sicherheit dient hierbei das Risiko, das sich aus der Verknüpfung der Eintrittshäufigkeit eines Ereignisses mit dem zugehörigen Schadenausmaß ergibt. Die Ermittlung der möglichen Eintrittshäufigkeiten erfolgt mithilfe einer Ereignisablaufanalyse. Hierbei werden ausgehend von einem auslösenden Ereignis die Systemantworten in der Reihenfolge ihres zeitlichen Auftretens abgefragt. In jedem Verzweigungspunkt wird unterschieden, ob ein Erfolg oder ein Versagen vorliegt, wodurch unterschiedliche Zweige im Ereignisablauf entstehen. Jeder Zweig im Ereignisablauf wird bis zu dem Zeitpunkt verfolgt, an dem das System einen endgültigen Zustand (Endzustand) erreicht hat und eine weitere Verzweigung nicht mehr möglich ist. Zusammengefasst ergeben die einzelnen Zweige einen sogenannten Ereignisbaum. Durch die Verknüpfung der Eintrittshäufigkeit eines auslösenden Ereignisses mit den Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf ergeben sich die Häufigkeiten der Endzustände. Folgende auslösende Ereignisse finden hierbei Berücksichtigung:

- Unfall
- Unfall mit Brandwirkung
- Technischer Defekt mit Brandwirkung

Zur Risikoermittlung sind im weiteren Schadensumaße zu den Häufigkeiten der Endzustände zu ermitteln. Für die häufigeren Ereignisse mit einer Kollision ohne Brand lassen sich diese über Unfallstatistiken abschätzen. Für die selteneren Ereignisse mit Brandfolge werden detaillierte Modellrechnungen erforderlich. Die Ermittlung von Einwirkungen auf Nutzer und Bauwerk durch Druck, Wärme und Schadgasen erfolgt mithilfe von CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics), die eine realitätsnahe Abbildung von Bränden und den Ventilationsverhältnissen innerhalb eines Tunnels ermöglichen. Darauf aufbauend werden mithilfe von Evakuierungsmodellen die Auswirkungen auf Tunnelnutzer bestimmt.

Auf Modellebene erfolgt im Weiteren eine differenzierte Betrachtung hinsichtlich Erfahrungen zum Methodischen Vorgehen, der Modellannahmen und Parameter sowie der Risikobewertung.

4.2.1 Methodisches Vorgehen

4.2.1.1 Ereignisablauf

Innerhalb des Ereignisablaufs sind zur Abbildung von Brandereignissen derzeit folgende Verzweigungen vorgesehen:

- Ereignisort (Einfahrtsbereich/Tunnelinnenstrecke)
- Verkehrsaufkommen (Tag/Nacht/...)
- Verkehrszustand (freier Verkehr/Stau)
- Brandlast (5/30/50/100 MW)
- Detektion erfolgreich (ja/nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich (ja/nein)
- Tunnelsperreinrichtung aktiviert (ja/nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja/nein)
- Weitere Sicherheitssystem vorhanden und aktiviert (ja/nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja/nein)
- Beginn der Fremdrettung

Ein Erweiterungsbedarf wird insbesondere in der Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen gesehen, die einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung und somit auf die Häufigkeit von

schweren Brandereignissen haben können. Von Interesse ist hierbei sowohl die Wirkung der Feuerwehr als auch von stationären Brandbekämpfungsanlagen. Darüber hinaus besteht Ergänzungsbedarf zur eindeutigeren Spezifizierung der Wirkung von Fremdrettungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Zeit bis zum Eintreffen am Ereignisort (Hilfsfrist).

Innerhalb des Ereignisablaufs werden derzeit lediglich Brände von Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren zugrunde gelegt. Wenn sich aufgrund der vermehrten Zulassung von Neufahrzeugen mit alternativen Antrieben eine Veränderung in der Häufigkeit bzw. Schwere von Bränden ergibt, sollte dies durch eine entsprechende Verzweigung in den Ereignisablauf mit aufgenommen werden.

4.2.1.2 Ermittlung von Einwirkungen

Stand der Technik bei der Ermittlung von Einwirkungen ist die Anwendung von CFD-Modellen. Nur durch deren Einsatz lassen sich die Freisetzung von Wärme, Rauch und Schadgasen sowie deren Ausbreitung im Verkehrsraum unter Berücksichtigung der Tunnelgeometrie (Querschnitt, Längsneigung), der Ventilation, dem Einfluss von Fahrzeugen sowie von Löschsystemen realitätsnah abbilden. Da das Ergebnis der Sicherheitsbewertung sehr stark durch die Initial- und Ausbreitungsrechnung beeinflusst wird, besteht in der Methode Ergänzungsbedarf hinsichtlich den Modellanforderungen (Genauigkeit, Auflösung, Ausgabewerte) und den Anforderungen an die Modellierung (Geometrie, Brandszenarien, Fahrzeuge, Lüftung).

Einen wesentlichen Einfluss auf die Bestimmung der Einwirkgrößen hat der Brandverlauf. Infolge einer schweren Kollision mit Brandfolge ist zu erwarten, dass dies eine sehr schnelle Brandentwicklung nach sich zieht. Demgegenüber wird sich im Fall eines Brandes infolge eines technischen Defekts (Selbstzündung) ein deutlich verzögerter Brand entwickeln. Da beide Szenarien eintreten, sollten hierzu entsprechende Brandverläufe bereitgestellt werden.

Die Berücksichtigung von zusätzlichen Brandszenarien wird erforderlich, wenn zukünftig durch Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Gasantrieb, E-Antrieb, Brennstoffzellen) eine Änderung in der Brandleistung der Fahrzeuge oder in der Art und Menge an freigesetzten Stoffen gegenüber den bisherigen Annahmen zu erwarten ist.

Darüber hinaus sollten in das Verfahren zusätzliche sicherheitsrelevante Maßnahmen mit aufgenommen werden, die zu einer Reduzierung der Einwirkgrößen beitragen können. In Betracht kommt hierbei die Berücksichtigung von stationären Löschsystemen sowie eine aktive Brandbekämpfung durch die Feuerwehr.

Da die Ergebnisse der CFD-Berechnungen insbesondere von Anfangsbedingungen abhängen, wäre eine detailliertere Berücksichtigung fahrzeuginduzierter Längsströmungen hilfreich. Dies wird besonders bei sehr großen Querschnitten sowie in verzweigten Systemen relevant, um realistische Aussagen zu treffen.

4.2.1.3 Ermittlung von Auswirkungen

Das Verfahren ermöglicht die Verwendung von verschiedenen Modellen zur Bestimmung der Auswirkungen. Eingesetzt werden sowohl mikroskopische als auch makroskopische Modelle. Während mikroskopische Modelle Einzelpersonen in ihrer Flucht abbilden, erfolgt bei makroskopischen Modellen die Ausmaßermittlung über die Verkehrsdichte und den Fahrzeugbelegungsgrad. Eindeutig zu definieren sind die grundsätzlichen in den Modellen zu berücksichtigenden Parameter wie Einwirkgrößen, Fluchtgeschwindigkeit, Notausgänge, Alarmierung etc.. Darüber hinaus sollte die Wirkung der Fremddretung methodisch mit abgebildet werden können. Erweiterungsbedarf wird auch in der Berücksichtigung von Bauwerksrisiken gesehen.

4.2.2 Modellannahmen und Parameter

4.2.2.1 Häufigkeitsermittlung für Initialereignisse/Verkehrssicherheit

Eine maßgebliche Eingangsgröße in das Verfahren bildet die Eintrittshäufigkeit für das Initialereignis Unfall. Deren Bestimmung erfolgt auf Basis von Unfallraten, die bisher lediglich eine Differenzierung nach der Betriebsart (Richtungsverkehr/Gegenverkehr) sowie dem Vorhandensein von Zu- und Abfahrten innerhalb eines Tunnels erlauben. Die Beantwortung zahlreicher Fragestellungen erfordert jedoch weiter diversifizierte Eingangswerte. Hierzu sollten zukünftig auch Unfallraten verfügbar sein, mit deren Hilfe beispielsweise folgende tunnelspezifische Merkmale bei der Analyse und Bewertung von Risiken berücksichtigt werden können:

- Querschnittsausbildung (Anzahl Fahrstreifen, Querschnitt mit/ohne Seitenstreifen)
- Zulässige Geschwindigkeit
- Trassierung (Längsneigung, Kurvigkeit)
- Verkehrsbelastung
- Tunnellänge

4.2.2.2 Brandentwicklung/Brandverlauf

Der den Modellrechnungen (CFD-Berechnungen) zugrundeliegende Brandverlauf hat einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Analyse und Bewertung von Risiken. Zur standardisierten Abbildung eines Brandverlaufs ist in den ZTV-Ing Teil 5 „Tunnelbau“ eine Temperatur-Zeit-Kurve definiert. Hierbei handelt es sich um eine Designkurve für den baulichen Brandschutz, bei der nach Brandbeginn die Temperatur innerhalb von 5 Minuten auf 1.200 °C ansteigt, anschließend 25 Minuten auf diesem Temperaturniveau gehalten wird und danach über die Dauer von 110 Minuten wieder abklingt. Soll ein erhöhter Brandschutz berücksichtigt werden, wird das Temperaturniveau von 1.200 °C über 55 Minuten gehalten. Im Rahmen des FE 15.0550/2011/ERB[13] konnte gezeigt werden, dass zur Nachbildung des Temperaturverlaufs in den ersten 5 Minuten eine Zunahme in der Energiefreisetzungsrate (HRR) von ca. 0,83 MW/s erforderlich wird. Danach wird eine Brandleistung von 5 MW nach 6 sec, eine Brandleistung von 30 MW nach 36 sec und Brandleistung von 100 MW nach 120 sec erzielt. Derartig schnelle Zunahmen in der Energiefreisetzung sind charakteristisch für den Übergang (Flashover) von der Phase der Brandentwicklung zu einem Vollbrand. Die Dauer der Phase der Brandentwicklung ab dem Zeitpunkt der Zündung ist abhängig von der Art der Verbrennung, der Art des Brennstoffs, der Wechselwirkungen mit der Umgebung und dem Zugang zu Sauerstoff. Die Phase der Brandentwicklung kann im Fall von schweren Kollisionen äußerst kurz ausfallen (0 bis wenige Sekunden) und im Fall einer Entzündung infolge technischen Defekts mehrere Minuten betragen. Bei einer kurzen Brandentstehungsphase kann die Wirkung von Maßnahmen zur Schadensbegrenzung sehr limitiert sein. Daher sollte eine Differenzierung in Brandverläufe mit und ohne Brandentstehungsphase erfolgen. Um Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Gasantrieb, E-Antrieb, Brennstoffzellen) berücksichtigen zu können, werden ggf.

darüber hinaus zusätzliche Brandleistungen und/oder Brandverläufe notwendig.

4.2.2.3 Ereignisdetektion

Die Erkennung eines Ereignisses ist eine Grundvoraussetzung für die Aktivierung weiterer Sicherheitssysteme in einem Tunnel. Daher werden zur Überwachung und Steuerung eines Tunnels verschiedene Sensoren innerhalb des Verkehrsraums installiert. Für das automatische Erkennen von Brandereignissen kommen linienhafte Wärmemeldesysteme und optische Systeme zur Rauchererkennung wie z. B. Sichttrübungsmessgeräte, Rauchdetektoren oder Videosysteme mit digitaler Bildauswertung (Videodetektionssysteme) zum Einsatz. Manche dieser Systeme lösen im Ereignisfall lediglich einen Voralarm aus und erfordern die Reaktion eines Operators. Außerdem können deutliche Unterschiede in der Detektionszeit zwischen den einzelnen Systemen bestehen. I. d. R. erfolgt eine Rauchererkennung über optische Systeme deutlich frühzeitiger als die Detektion eines Temperaturanstiegs mittels eines Linienbrandmelders. Die Erkennung eines Brandereignisses über automatische Brandmeldeeinrichtungen hat nach den EABT-80/100 (2019) innerhalb von 60 sec zu erfolgen. Um die Wirkung einzelner Systeme besser berücksichtigen zu können, sollte das tatsächliche Detektionsverhalten abgebildet werden. Im Hinblick auf die Ereignisdetektion wird daher insbesondere ein Ergänzungsbedarf in der Berücksichtigung des Reaktionsverhaltens von Operatoren sowie in Vorschlägen zur detaillierteren Abbildung des Detektionsverhaltens einzelner Sensorsysteme gesehen.

4.2.2.4 Aktivierung von Sicherheitssystemen

Die Aktivierung von Sicherheitssystemen nach der Detektion eines Brandereignisses hat einen entscheidenden Einfluss auf die Selbstrettungsbedingungen und somit auf die zu erwartenden Schadensausmaße. Hinsichtlich der Zeit, innerhalb der ein Sicherheitssystem in vollem Umfang verfügbar sein soll, werden in den EABT-80/100(2019) lediglich Anforderungen zur Aktivierung der Lüftung und der Tunnelsperreinrichtung gegeben. Danach muss eine Längslüftung mit Strahlventilatoren 60 sec und ein Lüftungssystem mit Axialventilatoren 90 sec nach Alarmauslösung mit der erforderlichen Leistung zur Verfügung stehen. Die Tunnelsperreinrichtung ist unmittelbar nach Alarmauslösung zu aktivieren. Eine Zeit bis die Sperreinrichtung ihre Wir-

kung entfaltet wurde bisher nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurde bisher davon ausgegangen, dass die Alarmierung der Tunnelnutzer ebenfalls unmittelbar mit Alarmauslösung erfolgt. In der Realität tritt jedoch in der Alarmierung ein Zeitverzug auf, bis die Durchsagetexte einmal vollständig übertragen wurden. Um eine realistischere Abbildung zu erhalten, sollte zukünftig sowohl eine entsprechende Aktivierungszeit für die Sperreinrichtung als auch eine entsprechende Alarmierungszeit für die Tunnelnutzer mit berücksichtigt werden.

4.2.2.5 Reaktion von Tunnelnutzern

Die Reaktionszeit, bis Tunnelnutzer mit der Flucht beginnen und mit welcher Geschwindigkeit sie dann flüchten, kann die zu erwartenden Schadensausmaße beeinflussen. Bisher erfolgte keine explizite Berücksichtigung der Reaktionszeit und als Fluchtgeschwindigkeit wurden 1,3 m/s angenommen. Die Zeit bis zum Beginn der Flucht wurde innerhalb der gewählten Fluchtgeschwindigkeit gesehen. Zur Berücksichtigung dieses Zeitverzugs sollte eine Reaktionszeit (premovement time) zukünftig mit berücksichtigt werden.

4.2.3 Risikobewertung

Die Bewertung der Risiken erfolgte bisher durch einen relativen Vergleich mit einem Referenztunnel, der den Vorgaben der RABT/EABT-80/100 (2019) entspricht. Dies hat sich als zielführend erwiesen, da dadurch Einflüsse auf das Ergebnis infolge von Modellunschärfen weitestgehend eliminiert werden. Es sollten jedoch klare Definitionen beispielsweise im Hinblick auf die geometrische Ausbildung des Referenztunnels gegeben werden.

4.3 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Es zeigt sich, dass die entwickelte Methodik grundsätzlich immer noch zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln geeignet ist und durch ihren modularen Aufbau offen für Erweiterungen ist. Dadurch, dass es sich nicht auf die Verwendung spezieller Modelle fokussiert, ist eine hohe Zukunftsfähigkeit garantiert. Im Zuge der Überarbeitung sollte allerdings eine Präzisierung der funktionalen Anforderungen an die Modelle zur Ermittlung der Ein- und Auswirkungen erfolgen. Als eine dringliche Erweiterung wird die Berücksichtigung von weiteren

Parametern bei der Bestimmung der Unfallhäufigkeiten gesehen. Darüber hinaus sollten zusätzliche Brandszenarien bzw. Brandverläufe zur Berechnung von Einwirkungen Eingang finden. Insgesamt ist eine realitätsnahe Abbildung der wesentlichen Abläufe anzustreben. In einem weiteren Schritt wird es erforderlich, die Verbesserungsvorschläge entsprechend zu priorisieren.

5 Risikobasierte Untersuchungen zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

5.1 Risikobasierte Sicherheitsbewertung

Mit der Publikation der Richtlinie 2004/54/EG [1] der Europäischen Kommission über die Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im trans-europäischen Straßennetz und der in Artikel 13 genannten Anforderungen hinsichtlich Risikoanalysen wurde der regulatorische Rahmen geschaffen, um risikobasierte Sicherheitsbewertungen neben der Umsetzung von normativen Sicherheitsvorkehrungen im europäischen Raum zu etablieren. Bis dahin kamen überwiegend maßnahmenorientierte Ansätze zur Anwendung. Risikobasierte Überlegungen wurden partiell berücksichtigt, indem beispielsweise Tunnelausrüstungs-Anforderungen an die Ausprägung risikorelevanter Merkmale geknüpft wurden (z. B. Maßnahmen in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens oder der Tunnellänge). Vereinzelt wurden aber auch vor der Veröffentlichung der Richtlinie 2004/54/EG in verschiedenen Ländern schon risikobasierte Sicherheitsbewertungen für Straßentunnel angewandt. Diese kamen in erster Linie für komplexe und/oder sehr lange Tunnel zur Anwendung.

Aufbauend auf den Anforderungen der Richtlinie 2004/54/EG wurden in den letzten zehn Jahren zahlreiche (unterschiedliche) Ansätze zu risikobasierten Verfahren entwickelt und in der Praxis implementiert. In der Richtlinie 2004/54/EG werden hinsichtlich der Umsetzung wie auch hinsichtlich der methodischen Aspekte für Risikoanalysen lediglich grobe Anforderungen formuliert. Dies hat den Mitgliedsländern und den assoziierten Ländern die Freiheiten gelassen, länderspezifische Anforderungen aus bereits bestehenden Regelwerken ebenfalls zu berücksichtigen, um so die übergeord-

neten Anforderungen möglichst passend umzusetzen. Dementsprechend zeigt sich heute auch ein vergleichsweise breites Spektrum an Verfahren und zugehörigen Methoden, die in den einzelnen Ländern zur Anwendung kommen (siehe Kapitel 5.2).

Mit der Entwicklung der länderspezifischen Verfahren, Methoden und Modelle einhergehend nahm entsprechend auch die Zahl der Praxisanwendungen von risikobasierten Sicherheitsbewertungen stark zu. Diese Praxiserfahrungen führten dazu, dass einerseits individuell sicherheitsrelevante Fragestellungen mittels Risikoanalysen vertieft untersucht wurden, andererseits wurden verschiedene Elemente möglicher Ereignisabläufe in Straßentunneln verstärkt mit spezifischen Berechnungsmethoden und Modellen hinterlegt, die im Laufe der Zeit eine verstärkt detaillierte Untersuchung resp. Berücksichtigung einzelner Einflussgrößen erlaubte (z. B. Simulation des Fluchtverhaltens). Überdies wurden mittlerweile einzelne Methoden in Form von Computermodellen abgebildet und so einfacher nutzbar gemacht. Damit haben sich seit der Entwicklung des Verfahrens gemäß BAST Heft B66 signifikante Änderungen ergeben, indem heute erheblich mehr und breiter abgestützte Erfahrungen mit einer Vielzahl mittlerweile etablierter Verfahren, Methoden und Ansätze vorliegen.

Vor diesem Hintergrund wurden mit Blick auf den Bedarf und das Potenzial hinsichtlich Weiterentwicklung des Verfahrens gemäß Heft B66 im Zuge des vorliegenden Forschungsprojektes auf der Richtlinie 2004/54/EG basierende regulatorische Verfahren wie auch Studien und Untersuchungen zu spezifischen risikorelevanten Fragestellungen gesammelt und ausgewertet. Die Analysen sollten zum einen eine grobe Einordnung des Verfahrens gemäß BAST Heft B66 ermöglichen,¹ zum anderen sollten Grundlagen identifiziert werden, die für die spezifische Berücksichtigung einzelner Verfahrenselemente (z. B. methodische Aspekte) in einem späteren Schritt herangezogen werden können (Arbeitsschritt 3 bis 5).

Die wichtigsten Inhalte und Aspekte ausgewählter Verfahren, Studien und Untersuchungen sind im Anlagebericht in Form von Factsheets zusammengefasst.

¹ Insbesondere im Vergleich mit regulatorischen Vorgaben in anderen Ländern.

5.2 Anwendung im Kontext regulatorischer Vorgaben im Ausland

Wie dargelegt, wurden in den letzten zehn Jahren zahlreiche unterschiedliche Regelwerke entwickelt oder angepasst, um die Anforderungen der europäischen Richtlinie umzusetzen. Für das vorliegende Forschungsprojekt wurden in erster Linie die regulatorischen Vorgaben derjenigen Länder vertieft analysiert, in welchen das Thema der Tunnelsicherheit einen besonders hohen Stellenwert hat. Eine vergleichende Übersicht etablierter Praxismethoden verschiedener Länder findet sich u. a. auch in zusammenfassenden Reports der PIARC ([6], [7]).

5.2.1 Österreich

Die regulatorischen Vorgaben in Österreich sind in der Richtlinie RVS 09.03.11 [8] dokumentiert. Diese wurde als Reaktion auf die in der EU-Direktive 2004/54/EG definierten Anforderungen einer nationalen Risikoanalysemethode entwickelt und erstmals 2008 publiziert. Im Zeitraum 2012-2015 erfolgte eine grundlegende Überarbeitung auf Basis von gesammelten Erfahrungen und Erfordernissen aus der praktischen Anwendung. Die 2015 publizierte Fassung ist seither unverändert gültig. In der RVS 09.03.11 werden sowohl das Risikomodell einschließlich Risikobewertung beschrieben als auch die regulatorischen Anforderungen an die Anwendung definiert.

Mithilfe des österreichischen Tunnel-Risikoanalysemodells (TuRisMo) ist es möglich, potenzielle Gefährdungen in Straßentunneln und deren Auswirkungen auf Tunnelnutzer in quantitativer Form (Risikoerwartungswert) darzustellen und zu bewerten. Mit diesem systembasierten Untersuchungsansatz werden Risikowerte für den Tunnel als Gesamtsystem ermittelt, d. h. es werden alle Ereignisse mit Einfluss auf die Personensicherheit in Form einer Auswahl eines Sets repräsentativer Szenarien mitberücksichtigt. Im Zuge der Risikoermittlung werden die Risikoanteile infolge mechanischer Schadenswirkungen, Brandwirkungen und Gefahrgutwirkungen getrennt dargestellt und können auch getrennt bewertet werden.

Das österreichische Tunnelrisikomodell ist in zwei Versionen verfügbar:

- Als Standardmodell, das auf vorberechneten Schadensausmaßwerten (für Brandszenarien) für Modelltunnel beruht, und

- als detailliertes Risikomodell, bei dem – ähnlich zur deutschen Methode – im Anwendungsfall detaillierte Simulationen für Schadensausmaßermittlung der Brandszenarien durchgeführt werden.

Die Methodik des österreichischen Risikoanalysemodells besteht aus zwei Kernelementen: der quantitativen Häufigkeitsanalyse in Form eines Ereignisbaumes und der quantitativen Schadensausmaßanalyse. Folgende Szenarien werden dabei berücksichtigt:

- Pannen mit Brand bzw. mit und ohne Kollisionen als Folgeereignis
- Alleinunfälle mit und ohne Brand bzw. mit und ohne Kollisionen als Folgeereignis
- Unfälle im Richtungs- bzw. Gegenverkehr mit und ohne Brand als Folgeereignis
- Bei Bränden werden zusätzlich drei unterschiedliche Verkehrszustände unterschieden: fließender Verkehr, Stau infolge Verkehrsüberlastung und entstehender Stau infolge eines vorangegangenen Ereignisses (Panne oder Unfall)

Die Schadensausmaßanalyse untersucht Schadensszenarien bezüglich mechanischer Wirkungen, Brand- als auch Gefahrgutwirkungen. Die mechanischen Schadenswirkungen von Verkehrsunfällen werden auf Basis statistischer Auswertungen von Tunnelunfällen mit Personenschaden abgeschätzt. Die Schadenswirkungen von Bränden werden mithilfe eines aus mehreren Modulen bestehenden Modells berechnet. Hierbei werden ein instationäres eindimensionales und ein dreidimensionales Strömungsmodell mit einer Evakuierungssimulation kombiniert. Alle tunnelspezifischen baulichen Eigenschaften, der detaillierte Ausrüstungsstandard (insbesondere betreffend Verkehrsmanagement, Ereignisdetektion, Alarmierung und Betrieb der Tunnellüftung), aber auch unterschiedliche Brandorte und Verkehrszustände werden dabei berücksichtigt.

In der Praxis dient das Tunnel-Risikomodell im Zuge der sicherheitstechnischen Bewertung von Straßentunneln als zusätzliches Werkzeug, in Ergänzung zu gesetzlichen Vorgaben bzw. maßnahmenorientierten Vorgaben in Richtlinien. Es kann für verschiedene Zwecke eingesetzt werden, z. B. zum Nachweis der Einhaltung des Mindestsicherheitsniveaus bei geringfügigen Abweichungen von Min-

destanforderungen, zur Bewertung von besonderen Charakteristiken, von besonderen Betriebszuständen (z. B. Sanierungsphase) oder Sicherheitsmaßnahmen aller Art. Des Weiteren findet es Anwendung in Fragen der gemäß österreichischen Richtlinien erforderlichen Zuordnung eines Tunnels zu einer Gefährdungsklasse als Grundlage für dessen Ausstattungsfestlegung.

Das österreichische Risikoanalysemodell ist aufgrund seines modularen Aufbaus für alle Arten von Tunneln und für unterschiedlichste Fragestellungen anwendbar. Es wurde in Österreich, der Schweiz und Deutschland wie auch in anderen europäischen Ländern sowie auf internationaler Ebene eingesetzt.

Im Vergleich zur Methodik gemäß BAST Heft B66 zeigen sich folgende Gemeinsamkeiten/Unterschiede:

- Die methodische Grundstruktur von TuRisMo ist grundsätzlich sehr ähnlich zur deutschen Methode.
- Hinsichtlich der Häufigkeitsermittlung werden einige Aspekte zusätzlich/direkt berücksichtigt: Stau und Folgeereignisse, Lkw-Anteil.
- Bei der Schadensausmaßermittlung für Brand-szenarien zeigen sich folgende spezifische Unterschiede:
 - Es werden mehr Brandszenarien berechnet (mehrere Brandstandorte, unterschiedliche Verkehrsstärken, initiale Strömungssituation etc.)
 - Die zeitlichen Abläufe werden spezifischer abgebildet: Brandentwicklung, Detektion und Folgehandlungen.
 - Das Fluchtverhalten wird probabilistisch abgebildet (Zeitpunkt Fluchteinleitung, Eigenschaften Personenkollektiv, Berücksichtigung Fehlverhalten, Ereignisstandorte).
 - Es kommt ein akkumulationsbasiertes Intoxikationsmodell (Purser) zur Modellierung der personenbezogenen Auswirkungen von Hitze und Rauchgasen zur Anwendung.

5.2.2 Schweiz

Auch die Schweiz hat die übergeordneten Anforderungen der EG-Richtlinie 2004/54/EG für das Nationalstraßennetz übernommen. Das Vorgehen ist in

der Richtlinie „Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen“ (Richtlinie 19004) [21][6] dokumentiert und setzt eine Anforderung des Departments „Umwelt, Verkehr, Energie und Umwelt (UVEK) „Sicherheitsanforderungen an Tunnel im Nationalstraßennetz“ um. Das Verfahren definiert die für das Schweizerische Nationalstraßennetz anwendbare Methodik zur Risikoermittlung. In Ergänzung zur Richtlinie wurden erläuternde Dokumentationen erstellt, welche die methodischen Grundlagen beschreiben und ein Anwendungsbeispiel zeigen. Die Methodik ist in der Dokumentation ASTRA 89005 „Risikokzept für Tunnel der Nationalstrassen“ [22] beschrieben.

Die Richtlinie spezifiziert den Vollzug von Risikoanalysen zur Sicherstellung einer ausreichenden Personensicherheit in Tunneln der Nationalstrassen. Sie legt die Grundsätze fest, nach welchen Methoden, in welchen Projektphasen und bei welchen spezifischen Bedingungen Risikoermittlungen und Risikobewertungen durchgeführt werden müssen. Zudem zeigt sie auf, unter welchen Bedingungen kein Vollzug, ein vereinfachter Vollzug und ein detaillierter Vollzug notwendig ist. Die Richtlinie gilt für alle bestehenden und neuen Tunnel des Nationalstraßennetzes ab einer Länge des längsten Fahrstreifens von 300 m. Sie ist für alle Phasen des Lebenszyklus der Bauwerke anwendbar: Planung, Projektgenerierung, Bau, Betrieb und Unterhalt. Ebenso kann sie für Einhausungen und Galerien zur Anwendung gelangen. Die Systemgrenzen der Richtlinie umfassen den Tunnel sowie 50 m vor allen Einfahrtsportalen und 50 m nach allen Ausfahrtsportalen.

Die Risikoanalyse berücksichtigt folgende Gefahren/Szenarien:

- Verkehrsunfälle mit Personenschäden,
- Brandereignisse infolge von Unfällen,
- Brandereignisse infolge elektrischer Defekte und Überhitzungen sowie
- Brandereignisse infolge mechanischer Überhitzung.

Des Weiteren sind auch Gefahren aus Gefahrgutereignissen berücksichtigt:

- Lachenbrand,
- Explosionen sowie
- Freisetzung toxischer Substanzen.

Die Risikoanalyse hat zum Ziel, den nominellen Erwartungswert der Anzahl an Todesfällen und Verletzten pro Jahr in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten, zu bestimmen. Dabei wird auch der Einfluss bestehender bzw. möglicher zusätzlicher Maßnahmen berücksichtigt. Für die Analyse wird der Tunnel hinsichtlich der risikorelevanten Einflussgrößen in homogene Segmente unterteilt. Die Risiken werden pro Segment und Fahrtrichtung ermittelt und für den Tunnel aggregiert.

Das zugehörige methodische Verfahren beruht auf Berechnungen mithilfe von Bayes'schen Netzen. Die Schweizer Methode erlaubt so eine detaillierte und umfassende Analyse des Einflusses verschiedener Tunnelcharakteristika und anderer risikorelevanter Einflussgrößen. Hierbei sind insbesondere auch die probabilistischen Elemente der Risikoanalyse sehr detailliert abbildbar. Etwas weniger ausgeprägt sind die Möglichkeiten, die ausmaßseitigen Einflussgrößen spezifisch darzustellen. Als Folge davon ist die Methode verhältnismäßig komplex und aufwendig in der Anwendung. Sie ist transparent und nachvollziehbar, bedarf aber in der Anwendung eines vertieften Verständnisses von Bayes'schen Netzen. Die Erfahrung zeigt, dass die Zahl der praktischen Anwendungen infolgedessen beschränkt ist und teilweise auf andere Methoden ausgewichen wird (insbesondere bei weniger komplexen Situationen/Fragestellungen). Zur Anwendung gelangt die Methode insbesondere bei komplexen Bauwerken (z. B. Planung zweite Röhre Gotthard-Straßentunnel).

Im Vergleich zur Methodik gemäß BAST Heft B66 zeigen sich folgende Gemeinsamkeiten/Unterschiede:

- Die Grundprinzipien des Verfahrens sind grundsätzlich mit denjenigen des deutschen vergleichbar.
 - Das Verfahren weist ebenfalls einen erhöhten Komplexitätsgrad auf (wenn auch die Komplexität auf unterschiedlichen Ebenen liegt).
 - Das methodische Vorgehen zur Häufigkeitsermittlung basiert im Schweizer Verfahren nicht auf einer Ereignisbaumanalyse, sondern wird mittels Bayes'scher Netze umgesetzt.
 - Einige Tunnelcharakteristika können teilweise noch etwas detaillierter abgebildet werden (z. B. Segmentierung, Fahrspuren, Kurvenradien).
- Die Schadenausmaßermittlung erfolgt im Vergleich vereinfacht und kann spezifische Tunnелеigenschaften weniger detailliert abbilden.
 - Es werden sowohl individuelle wie auch kollektive Risiken ermittelt und für die Beurteilung herangezogen. Werden die festgelegten (absoluten) Grenzwerte für die individuellen Risiken eingehalten, so werden etwaige zusätzliche Maßnahmen nach dem Verhältnismäßigkeitsprinzip (Kosten-Wirksamkeit) beurteilt.
 - Es werden auch Gefahrgutrisiken abgebildet (jedoch existiert dazu in der Schweiz wie auch in Deutschland auch ein separates Verfahren mit einer spezifischen Methodik).
 - Das Verfahren ist insgesamt etwas stärker formalisiert als die deutsche Methodik.

5.2.3 Niederlande

In dem Gesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Warvw 2013, [10]) wird die Durchführung von Risikoanalysen für Tunnel nach der in der Verordnung (Rarvw 2013, [17]) festgelegten Methode gefordert. Danach ist die Sicherheit von Tunneln mittels der Methodik der quantitativen Risikoanalyse (QRA) zu überprüfen. Hierzu ist das Modell QRA-Tunnel anzuwenden, dessen Umsetzung in dem Programm QRA-Tunnel 2.0 erfolgte. Eine ausführliche Beschreibung der Modellgrundlagen ist im Hintergrunddokument QRA-Tunnel 2.0 [18] enthalten.

Das Modell QRA-Tunnel dient zur Überprüfung der Einhaltung von Sicherheitsanforderungen in Straßentunneln und zum Nachweis der Wirkungen von Sicherheitsmaßnahmen. Es ist für alle neuen Tunnel sowie für Tunnel im Bestand ab einer Länge von 250 m anzuwenden. Die Länge des Tunnels wird hierbei durch den längsten geschlossenen Abschnitt bestimmt. Für Bestandstunnel ergibt sich die Notwendigkeit zur Anwendung des Modells, wenn wesentliche Änderungen am Bau, an den Einrichtungen oder an der Nutzung eines Tunnels vorgenommen werden. Die Methodik zur Ermittlung der Risiken basiert auf der Verknüpfung von Eintrittswahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Schadensausmaßen eines bestimmten Ereignisses. Das Modell ermöglicht die Berücksichtigung folgender Ereignisse/Szenarien:

- Unfälle mit Sachschäden
- Unfälle mit Personenschaden
- Brandereignisse infolge von Unfällen und technischen Defekten
- Gefahrgutfreisetzen

Mit dem Modell lassen sich aber ausschließlich Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung analysieren.

Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für ein Szenario/Ereignis erfolgt mithilfe eines vorgegebenen Ereignisablaufs bzw. einer Ereignisbaumanalyse. Zur Ermittlung der Einwirkungen infolge von Bränden und Gefahrgutfreisetzen wurden zahlreiche Szenarien unter Variation der geometrischen Verhältnisse (Längsneigung, Querschnittsbreite), der Ventilationsbedingungen, der Energie- und Gefahrgutfreisetzen mittels eines CFD-Modells (Fire Dynamics Simulator) in einem 400 m sowie einem 2.000 m langen Modelltunnel vorberechnet. Darauf aufbauend erfolgt in Abhängigkeit der daraus resultierenden Umgebungsbedingungen durch die Einwirkung von Rauch auf die Sichtverhältnisse, toxischen Gasen, Wärme, Druck die Ermittlung von Personenschäden. Hierbei wird in Teilen auf das Modell von Purser zurückgegriffen, um verstärkende Effekte durch das gleichzeitige Einwirken mehrerer Schadgrößen berücksichtigen zu können.

Die Berechnungsergebnisse werden sowohl als individuelle wie auch als kollektive Risiken (Schadenerwartungswert, FN-Kurven) ausgewiesen. Zur Beurteilung der Risiken wird in dem Gesetz über die Sicherheit von Straßentunneln ein Grenzkriterium definiert.

Das Verfahren ist in den Niederlanden obligatorisch für alle neuen sowie für bestehende Tunnel, sobald wesentliche Änderungen an der Bauwerksstruktur, den Einrichtungen oder deren Nutzung vorgenommen werden, ab einer Länge von 250 m anzuwenden. Unterstützt wird der Anwender durch die Software QRA Tunnel 2.0, in der das Verfahren umgesetzt ist. Die Anwendung erfordert jedoch ein vertiefteres Wissen über die Zusammenhänge und Abläufe zur Analyse und Bewertung von tunnelspezifischen Risiken. Die wesentlichen Modellgrundlagen werden in einem Hintergrunddokument aufgezeigt. Zur Anwendung der Software wird ein Benutzerhandbuch [19] bereitgestellt.

Im Vergleich zur Methodik gemäß BAST Heft B66 zeigen sich folgende Gemeinsamkeiten/Unterschiede:

- Die Methodik zur Ereignisablaufanalyse sowie zur Ermittlung von Schadensausmaßen ist sehr ähnlich zum Verfahren der BAST nach Heft B66.
- Mit dem Verfahren ist ausschließlich eine Betrachtung von Richtungsverkehrstunneln möglich.
- Es werden auch Gefahrgutrisiken abgebildet (in Deutschland eigenes Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln).
- Es wird im Modell eine Unterscheidung von Bränden mit schnellem und langsamem Brandverlauf vorgenommen.
- Die Schadensausmaßermittlung basiert auf vorberechneten Szenarien (für 400 m und 2.000 m lange Tunnel).
- Für die Bewertung der Risiken wird auf ein absolutes Grenzkriterium abgestützt, das rechtlich in einem Gesetz verankert ist.
- Das Verfahren ist zur einfacheren Anwendung in einer spezifischen Softwarelösung umgesetzt.

5.2.4 Frankreich

Das Verfahren zur Umsetzung der Anforderungen nach EG-Richtlinie 2004/54/EG in Frankreich basiert auf der „Sicherheitsdokumentation, Heft 4“ [24]. Diese Dokumentation zeigt das umzusetzende Verfahren zur Sicherheitsbewertung auf. Als Teil dieser Sicherheitsdokumentation wird für jeden Tunnel mit einer Länge von mehr als 300 m eine spezifische Gefahrenanalyse durchgeführt. Diese umfasst auch eine grobe quantitative Bewertung der Häufigkeiten von (Brandszenarien auslösenden) Ereignissen und eine stark pragmatische Einschätzung der Risiken in einer Häufigkeits-Ausmaß-Matrix. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf szenariobasierten Ausmaßabschätzungen für als maßgeblich identifizierte (Brand-)Ereignisse und unterscheidet sich damit erheblich vom Verfahren nach Heft B66, das auf einem systembasierten Ansatz beruht. Die Vorgaben, wie diese Abschätzungen zu erfolgen haben, bieten aber einen vergleichsweise großen Spielraum.

In der Praxis führte dies dazu, dass teilweise für die Ermittlung der Brandwirkungen sehr heterogenen Ansätze zum Einsatz gelangten: 1D-Modelle oder pragmatische qualitative Abschätzungen für einfachere Anwendungsfälle oder 3D-CFD-Modellen für komplexe Tunnel. Die Methode wird grundsätzlich für ein breites Spektrum unterschiedlicher Tunnel verwendet, von Tunneln in der Planung bis hin zu komplexen Tunneln im Betrieb, für welche das Sicherheitsniveau nach der Sanierung bewertet wird.

Im Vergleich zur Methodik gemäß BAST Heft B66 zeigen sich folgende Gemeinsamkeiten/Unterschiede.

- Das methodische Vorgehen unterscheidet sich deutlich zum Verfahren nach BAST Heft B66.
- Der Ansatz ist – im Gegensatz zum deutschen Verfahren – szenariobasiert und nicht systembasiert, berücksichtigt also keine Gesamtsicht auf die Risiken für den Tunnel resp. das Kollektiv möglicher Szenarien als Maß für die Beurteilung des Sicherheitsniveaus.
- Das Vorgehen ist zwar risikobasiert, fokussiert aber stark auf die deterministische Analyse der Auswirkungen von Brandereignissen:
- Als Beurteilungsmaß wird ein richtlinienkonformer Referenzfall herangezogen.

5.3 Untersuchungen und Studien

Im Nachgang zu den großen Brandereignissen Ende der 90er-Jahre/Anfang der 2000er-Jahre wurden die Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Tunnelsicherheit in zahlreichen Ländern, aber auch auf übergeordneter Ebene erheblich intensiviert. Neben zusätzlichen resp. restriktiveren Maßnahmenanforderungen und zugehörigen Erweiterungen der regulatorischen Grundlagen wurden zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte, Studien und Untersuchungen initiiert, die sich mit verschiedensten Einflussfaktoren der Straßentunnelsicherheit auseinandersetzen. Ebenso wurden verschiedene nationale und internationale Expertengruppen ins Leben gerufen, die u. a. zu einem verstärkten Wissens- und Erfahrungsaustausch beitragen konnten.

Hinsichtlich der risikobasierten Sicherheitsbewertungen wurden, wie dargelegt, zahlreiche Verfahren und Methoden entwickelt und hierzu in den letzten

rund zehn Jahren weitreichende Erfahrungen gesammelt. Diese Praxiserfahrungen waren wiederum Anlass, um damit zusammenhängende Fragestellungen wie beispielsweise zu methodischen Überlegungen, zu einzelnen Modellparametern oder zu Modellierungsfragen in separaten Untersuchungen zu vertiefen.

All diese Entwicklungen hatten zur Folge, dass in den letzten Jahren ein signifikanter Erfahrungszuwachs zu verschiedenen Aspekten im Bereich der Tunnelsicherheit erfolgte. Diese Erkenntnisse lassen sich direkt oder indirekt auch in die Weiterentwicklung heutiger risikobasierter Sicherheitsbewertungen integrieren.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden verschiedene Studien und Untersuchungen gesammelt und ausgewertet, um eine erste Übersicht über das Spektrum der analysierten Themen und Fragestellungen zu gewinnen. Einige ausgewählte Studien und deren wichtigste Inhalte sind im Anhang A1 zum Bericht zusammengefasst. Thematisch sind hierzu u. a. berücksichtigt:

- Einfluss von Tunnelausstattungs-elementen (insbesondere Lüftung)
- Einfluss von betrieblichen Aspekten (Geschwindigkeit, temporäre Bauphasen)
- Einfluss neuer Fahrzeugantriebsformen (Elektromobilität)
- Fragestellungen zur Modellierung von Tunnelcharakteristika
- Fragestellungen zur Modellierung von Elementen im Ereignisablauf bei Bränden (z. B. Flucht Tunnelnutzer)

Eine vertiefte Analyse spezifischer Grundlagen ist aber nur dann zweckmäßig, wenn im Zuge der weiteren Projektbearbeitung die hinsichtlich der Weiterentwicklung relevanten Elemente des Verfahrens nach BAST Heft B66 identifiziert und festgelegt worden sind. Dann können zu diesen Elementen spezifische Informationen zur Umsetzung im Zuge von risikobasierter Sicherheitsbewertungen zielgerichtet ausgewertet werden.

5.4 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Die Erkenntnisse aus den Auswertungen zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Standardisierungsgrad**

Die heute bestehenden regulatorischen Vorgaben resp. etablierten Verfahren zur Risikobewertung entsprechend den Anforderungen der EG-Richtlinie 2004/54/EG sind (erwartungsgemäß) stark unterschiedlich. Nichtsdestotrotz gibt es verschiedene Verfahren, die in ihren zugrundeliegenden Grundprinzipien vergleichbar sind. Hier reiht sich auch das deutsche Verfahren ein. Im Vergleich zu den vertieft ausgewerteten Verfahren anderer Länder zeigt sich, dass das Verfahren nach BASt Heft B66 mehr Freiheitsgrade in der Umsetzung zulässt. Andere Verfahren machen zu einzelnen Elementen resp. deren modellhafter Berücksichtigung mehr Vorgaben. Hier zeigen die Auswertungen ein generelles Spannungsfeld, inwieweit für die risikobasierten Bewertungen enge Vorgaben gemacht werden oder Freiräume in der Umsetzung zugelassen werden. Im ersten Fall werden die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Praxisanwendungen und die Nachvollziehbarkeit erhöht, im zweiten Fall ergeben sich mehr Möglichkeiten, um spezifische Tunneleigenschaften abzubilden, die in stark formalisierten Verfahren weniger oder gar nicht abgebildet werden können.

- **Risikoanalyse/Modellparameter**

Einige der etablierten Verfahren berücksichtigen im Vergleich zum Verfahren nach BASt Heft B66 mehr/zusätzliche Tunneleigenschaften (Ausgestaltungscharakteristika und Maßnahmen) als direkte Einflussgrößen und Parameterwerte; dazu gehören beispielsweise eine erhöhte Anzahl an Fahrstreifen oder Kurvenradien. Ebenso finden sich teilweise stärker ausgeprägte Vorgaben und Hinweise zu anzusetzenden Parameterwerten. Ferner werden teilweise auch mehr resp. spezifischere Hinweise und Vorgaben zur Modellierung von Ereignisabläufen und zu berücksichtigenden Modellen gemacht (z. B. Verhalten Tunnelnutzer). Zu vielen Einflussfaktoren finden sich zahlreiche Untersuchungen und Studien, die für eine Umsetzung in die Weiterentwicklung des Verfahrens gemäß BASt Heft B66 herangezogen werden können.

- **Risikobewertung/-beurteilung**

Es besteht auch hinsichtlich der Kriterien zur Risikobewertung eine erhebliche Heterogenität. Während einige Verfahren auf vergleichende Verfahren mit einem richtlinienkonformen Tunnel als Referenz abstützen (wie das in Deutschland heute vielfach Praxis ist), ziehen andere absolute Grenzkriterien betreffend Sicherheitsniveau oder Verhältnismäßigkeitsbetrachtungen für etwaige zusätzliche Maßnahmen heran. Ebenso bestehen heute auch Verfahren, die neben den kollektiven Risiken auch die individuellen Risiken für die Tunnelnutzer als Beurteilungsmaß verwenden.

- **Komplexität und Aufwand**

Die Mehrzahl der heute etablierten Verfahren ist tendenziell aufwändig. Zur Praxisanwendung bedarf es eines vertieften Fachwissens im Bereich Straßentunnel und risikobasierter Verfahren. Zwar bestehen heute zu mehreren etablierten Verfahren zugehörige Software-Programme, welche die Umsetzung unterstützen und so den Aufwand reduzieren. Jedoch müssen die Anwender auch in diesen Fällen die methodischen Grundlagen gut kennen und Systemkenntnisse zu Tunneln einbringen, um die jeweiligen Tunneleigenschaften und möglichen Ereignisabläufe realitätsnah zu modellieren.

6 Ansätze für die Adaptierung der Bewertungsmethodik

Vor Festlegung eines Adaptierungsvorschlages, wurde eine breite Auslegordnung möglicher Weiterentwicklungen aufgezeigt und deren Bewertung/Priorisierung hinsichtlich Adaptierung der Bewertungsmethodik vorgenommen. Hier wurden punkto methodischer Weiterentwicklungen diejenigen Aspekte identifiziert, für welche einerseits maßgebliche neue Erkenntnisse vorliegen und die andererseits auch einen signifikanten Einfluss auf die Risikobewertung haben. Betreffend die verfahrensseitige Umsetzung wurden praktische Belange zur Verbesserung ermittelt und etwaige Anpassungen beurteilt. Anhand eines strukturierten, pragmatischen Vorgehens wurde eine Priorisierung für beide berücksichtigten Ebenen (Verfahrens- und Modellebene) entwickelt, anhand dessen die maßgeblichen Adaptierungsansätze evaluiert und selektiert wur-

den. Auf dieser Grundlage wurde die Entscheidung getroffen,

- welche Adaptierungen im gegenständlichen Projekt vorgenommen werden können (unter Berücksichtigung von zeitlichen und finanziellen Ressourcen),
- welche Adaptierungen zwar umsetzungswürdig erscheinen, wofür aber zusätzlicher Forschungs- bzw. Mittelaufwand benötigt wird und
- welche Adaptierungen nicht zweckmäßig sind und daher nicht weiter verfolgt werden sollten.

In Bild 2 sind die jeweiligen Prozessschritte schematisch dargestellt.

Der identifizierte Anpassungsbedarf setzt sich zusammen aus Erkenntnissen und Schlussfolgerungen aus der Anwendung im Zuge regulatorischer Vorgaben im Ausland, aus ergänzenden wissenschaftlichen Untersuchungen und Studien, Rückmeldungen aus der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Fachworkshops, und dem Betreuerkreis sowie aus den Erfahrungen der Forschungsnehmer.

Im Fachworkshop wurde folgender Ergänzungs-, Optimierungs- und Erweiterungsbedarf identifiziert:

- **Verfahresebene – Anwendungsbereiche**
 - Abbildung von Fremdrettungsvorgängen (Retten)
 - Berücksichtigung von Maßnahmen zur Unterstützung der Fremdrettung (Löschen)
 - Kombination Bauwerksbewertung und Nutzerbewertung (FE-Berechnung – CFD-Simulation)
 - Berücksichtigung alternativer Antriebsformen
 - Erweiterung um Resilienz betrachtungen
- **Modellebene – Methodisches Vorgehen bei der Ablaufmodellierung**
 - Fremdrettungsmaßnahmen

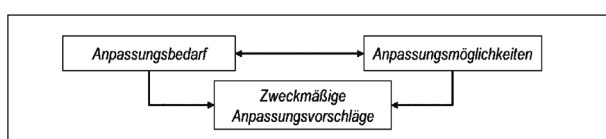


Bild 2: Schematischer Arbeitsplan von AP3

- Brandbekämpfungsanlagen
- Fahrzeugkollektiv (Antriebsysteme: Konventionell, Gas, Elektro, Brennstoffzelle), Lang-Lkw...)
- Fehlverhalten von Tunnelnutzern im Ereignisfall (Vorgaben geben)
- Berücksichtigung von mobilitätseingeschränkten und älteren Personen
- Differenziertere Berücksichtigung von Stau infolge verkehrlicher Überlastung/Ereignis/Verflechtungen (städtischer Tunnel)
- Stauzeiten in hochbelasteten Straßen (Qualitätsstufen)
- Kriterium für Stau/Definition (Verkehrstechnik, Lüftung, Tunnelsicherheit) mit Ausblick auf organisatorischen Maßnahmen
- Brandlast ggf. auf 3 Größen definieren
- Erweiterung des Geschwindigkeitsbereichs (derzeit Bezug auf 80/100 km/h)

- **Modellebene – Methodisches Vorgehen bei der Ermittlung von Einwirkungen**

- Brandszenarien (Kfz mit Verbrenner, Gasantrieb, E-Antrieb, Brennstoffzellen)
- Brandverläufe (schnell, langsam)
- Löschsysteme (Brandbekämpfungsanlagen (Wasser, Schaum), Feuerwehr)
- Fahrzeugbewegungen
- etc.

- **Modellebene – Methodisches Vorgehen bei der Ermittlung von Auswirkungen**

- Berücksichtigung einer pre-movement time (Ablauf gemäß RIMEA)
- Berücksichtigung von Maßnahmen der Fremdrettung
- Wahrnehmung von Sicherheitseinrichtungen/Gefahren
- Menschliches Verhalten/Fehlverhalten (Fahren in den Rauch)
- Verkehr staut sich nicht immer hinter einem Ereignis

- **Modellebene – Modellannahmen und Parameter**
 - Querschnittsausbildung (Anzahl Fahrstreifen, Querschnitt mit/ohne Seitenstreifen, Breite von Fahrstreifen)
 - zul. Geschwindigkeit (50 km/h, 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h, 130 km/h)
 - Trassierungsparameter (Längsneigung, Kurvigkeit)
 - Berücksichtigung unterschiedlicher Brandverläufe (schnell, langsam)
 - Berücksichtigung von Energiefreisetzungsraten für alternative Antriebe
 - Berücksichtigung des tatsächlichen Detektionsverhaltens (Brandmeldekabel, optische Systeme)
 - Reaktion eines Operators (Operator kann ggf. schneller auslösen, aber auch ausfallen)
 - Berücksichtigung eines Zeitverzugs für Alarmierung von Nutzern (Dauer der Durchsage)
 - Reaktion eines Operators (Operator kann ggf. schneller auslösen, aber auch ausfallen)
 - Berücksichtigung eines Zeitverzugs (nach Alarmierung) bis zum Beginn der Flucht (premovement time)
- **Modellebene – Risikobewertung**
 - Definition Referenztunnel (Regelbetrieb, Bauzustände...)
 - Relativvergleich wird als sinnvoll erachtet
 - Nutzerverhalten im Fall des Referenz-tunnels definieren
 - Bewertung der Erfordernis eines absoluten Risikokriteriums

Der o. g. Anpassungsbedarf, bestehend aus Erkenntnissen aus dem Fachworkshop, sowie aus der Analyse risikobasierter Untersuchungen im nahen Ausland (siehe Kapitel 5), den wurde im weiteren Verlauf strukturiert und hinsichtlich der Anpassungsmöglichkeiten bewertet. Das Resultat der Strukturierung bzw. dieses Bewertungsschrittes ist in den folgenden Kapiteln dargestellt. In den

7 Adaptierungsvorschlag für die Bewertungsmethodik

Der entwickelte Adaptierungsvorschlag für die Bewertungsmethodik wird in den folgenden Kapiteln wie folgt unterteilt:

- Verfahrensebene (siehe Kapitel 7.1)
- Modellebene – Risikobewertung (siehe Kapitel 7.2)
- Modellebene – Häufigkeitsermittlung (siehe Kapitel 7.3)
- Modellebene – Schadensausmaßermittlung Kollision (siehe Kapitel 7.4)
- Modellebene – Schadensausmaßermittlung Brand (siehe Kapitel 7.5)

7.1 Verfahrensebene

7.1.1 Allgemein

Bei der Analyse der bestehenden Bewertungsmethodik hat sich gezeigt, dass die im Verfahren entwickelte Methodik grundsätzlich immer noch zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln geeignet ist und durch ihren modularen Aufbau offen für Erweiterungen ist. Dadurch, dass es sich nicht auf die Verwendung spezieller Modelle fokussiert, ist eine hohe Zukunftsfähigkeit garantiert.

Bei den Anpassungen wurde besonderes Augenmerk auf folgende (z. T. bereits bestehende) allgemeine Eigenschaften in der Anwendung der Bewertungsmethodik gelegt:

- Flexibilität in der Anwendung
- Nötiges Maß an Komplexität und erforderlichem Aufwand
- Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der (Zwischen-)Ergebnisse
- Prozessuale Vergleichbarkeit von risikoreduzierenden Maßnahmen

7.1.2 Anwendungsbereich und Erfordernis von vertieften Risikoanalysen

Eine vertiefende quantitative Sicherheitsbewertung für Straßentunnel kann erfahrungsgemäß aufwändig sein. Aus diesem Grund wurde für wenig kritische Fälle (geringfügige Abweichungen vom Regelwerk und/oder generell eher geringe Risiken) ein vereinfachtes Verfahren entwickelt und im „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5)“ [4] dokumentiert. Eine Anpassung der darin definierten „Voranalyse zur Grobbeurteilung von Risiken und Kriterien für den erforderlichen Tiefgang in der Sicherheitsbewertung“ sollte in Abhängigkeit des in diesem Bericht angeführten Adaptierungsvorschlages diskutiert werden.

Der Anwendungsbereich von Risikoanalysen und die Ermittlung der Erfordernis einer vertieften Risikoanalyse sind im oben genannten Leitfaden angeführt. Demzufolge ist gemäß RABT 2006 für Tunnel ab einer Länge von 400 m eine Risikoanalyse zur Sicherheitsbewertung erforderlich, um festzustellen, ob zur Gewährleistung der Sicherheit im Tunnel zusätzliche Maßnahmen und/oder weitere Ausrüstungen erforderlich sind, die über dem Standard der RABT liegen:

- Ein Tunnel weist eine besondere Charakteristik bei Parametern auf, die unter anderem die Sicherheit im Tunnel beeinflussen. Dabei kann die Auflistung in der RABT/EABT herangezogen werden:
 - Tunnellänge
 - Anzahl der Tunnelröhren
 - Anzahl der Fahrstreifen
 - Fahrstreifenbreite
 - Querschnittsgeometrie
 - Ein- und Ausfahrten im Tunnel
 - Trassierung
 - Bauart
 - Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre (einschließlich der zeitlichen Verteilung)
 - Gefahr täglicher oder saisonaler Staubbildung
 - Zugriffszeit der Einsatzdienste
 - Anteil des Lkw-Verkehrs
 - Vorkommen, Anteil und Art des Gefahrgutverkehrs

- Merkmale der Zufahrtsstraßen
- Fahrstreifenbreite
- geschwindigkeitsbezogene Aspekte
- geografische und meteorologische Verhältnisse

- Für einen Tunnel können die baulich-technischen Anforderungen gemäß RABT nicht umgesetzt werden bzw. die Umsetzung ist mit unverhältnismäßig hohen Kosten verbunden.

7.1.3 Resilienz Aspekte

Im Zuge des Fachworkshops wurde von Teilnehmern der Wunsch geäußert, die aktuelle Bewertungsmethodik in Richtung Resilienz betrachten, sowie der Kombination mit Methoden zur Bauwerksbewertung (Finite Elemente-Berechnungen) zu erweitern.

Dazu sollte hervorgehoben werden, dass es sich bei der Bewertungsmethodik um eine Methode handelt, die primär der Bewertung des Personenrisikos dient und nicht dem Bauwerksrisiko bzw. der damit verbundenen Verfügbarkeit des Bauwerks. Nichtsdestotrotz können die Ergebnisse einzelner Module der Bewertungsmethodik (z. B. Temperaturverläufe aus CFD-Simulationen) für die Bauwerksbewertung herangezogen werden. Auch können die Ergebnisse der Risikoanalyse für Personensicherheit (wie z. B. im RITUN-Leitfaden [8]) auch in Methoden der Resilienzbewertung eingebaut und verwendet werden. Eine generelle Erweiterung der Bewertungsmethodik wird jedoch als nicht zweckmäßig erachtet und findet sich daher nicht im gegenständlichen Adaptierungsvorschlag wieder.

7.1.4 Bewertungsgrundlage

Die bestehende Bewertungsmethodik fokussiert in erster Linie auf die beiden Schadenindikatoren Personenschäden (Todesopfer) und Sachschäden (Euro). Die Risikobewertung mittels Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm erfolgt bis dato ausschließlich für den Schadenindikator Todesopfer.

Adaptierungen im Zuge der Überarbeitung erfolgen primär hinsichtlich des Schadenindikators Personenschaden; Fokus sind hierbei bspw. die Anpassungen etwaiger Annahmen zur Verteilung der Schadenausmaße, Schadenausmaßklasse oder erwartetem Ausmaß.

Für die Verteilungen und Ansätze für den Schadenindikator Sachkosten soll vorerst der Bestand der bestehenden Bewertungsmethodik belassen werden. Etwaige Anpassungen sind u. U. zweckmäßig, werden jedoch geringer priorisiert. Ebenso sollten keine weiteren Schadenindikatoren in die Methodik implementiert werden.

7.2 Modellebene – Risikobewertung

7.2.1 Verfahren gemäß Heft B66

Basierend auf der Ermittlung und Analyse der Risiken gilt es deren Akzeptabilität zu bewerten. In Heft B66 wird seinerzeit vorgeschlagen, die im Zuge der Risikountersuchungen ermittelten (kollektiven) Risiken in Form von Summenkurven in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm auszuweisen und mittels eines absoluten Bewertungskriteriums auf Basis definierter Akzeptabilitätsbereiche im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm zu beurteilen werden. Zur Schaffung einer einheitlichen Bezugsgröße werden dabei die Häufigkeiten auf eine Streckenlänge von 1 km und ein Jahr normiert. Darüber hinaus wird eine Berücksichtigung der Risikoaversion vorgeschlagen, die implizit über die Steigung der Akzeptabilitätslinie festgelegt ist. Bild 3 zeigt exemplarisch, wie die Darstellung der Risiken bzw. der Akzeptabilitätsbereich aussehen könnte.

Zeigt die Analyse der Risiken, dass die ermittelten normierten Summenkurven über der Akzeptabilitätslinie liegen, so sind gemäß dem vorgeschlagenen Verfahren zusätzliche/alternative Maßnahmen vorzuziehen. Für den zu untersuchenden Tunnel ist dann die Summenkurve unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen erneut zu bestimmen und aufgrund der relativen Lage zur Akzeptabilitätslinie erneut zu bewerten. Liegt die neu ermittelte Summen-

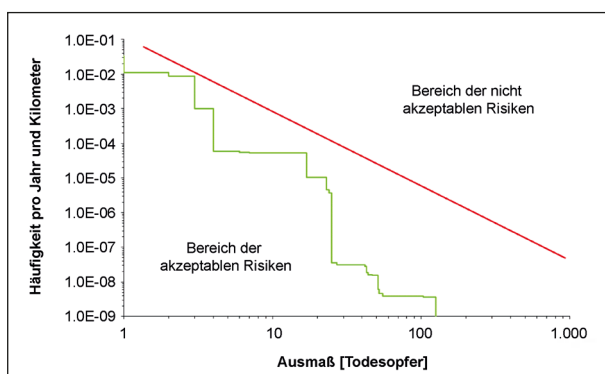


Bild 3: Darstellung der Risiken in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptabilitätsbereichen

kurve immer noch im nicht akzeptablen Bereich des Häufigkeits-Ausmaß-Diagramms, so sind weitere Maßnahmen zu untersuchen bzw. zu realisieren.

Bereits zum Zeitpunkt der Entwicklung des Verfahrens nach Heft B66 war aber absehbar, dass eine Festlegung eines absoluten Akzeptabilitätskriteriums noch nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde alternativ empfohlen die Risikobewertung auf Basis eines relativen Vergleichs der monetarisierten Risiken R_m [€/Jahr] zwischen dem Planfall (u. U. mit Abweichungen von der Richtlinie bzw. mit besonderer Charakteristik) und dem entsprechenden Wert für den theoretischen Fall einer richtlinienkonformen Ausgestaltung vorzunehmen. Dabei wird auf dem Grundsatz abgestützt, dass ein richtlinienkonformer Tunnel als sicher zu beurteilen ist. Bei der Selektion und Beurteilung von Maßnahmen wurde überdies empfohlen, Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen einzubeziehen.

7.2.2 Bisherige Umsetzung in der Praxis

Wie die Erfahrung zeigt, hat sich diese vergleichende Beurteilung der Risiken in der Praxis weitgehend etabliert. Wie bereits in Kapitel 4.2.3 dargelegt, hat die Praxis aber auch gezeigt, dass Bedarf besteht, die Definitionen hinsichtlich des Referenz隧nells zu schärfen.

Auch in verschiedenen anderen Ländern hat sich der relative Vergleich kollektiver Risiken als Grundlage für die Risikobewertung etabliert und bewährt. Zwar sind auch Ansätze etabliert und in verschiedenen Ländern regulatorisch verankert, welche auf einem absoluten Kriterium basieren, sie kommen aber in erster Linie im Bereich der Beurteilung von Risiken beim Transport von Gefahrgütern durch Tunnel zur Anwendung. Der vergleichende Ansatz weist insbesondere die vorteilhafte Eigenschaft auf, dass methodische Vorgaben zur Ermittlung der Risiken weniger eng an die Bewertungsmethodik gekoppelt werden müssen als dies bei der Anwendung absoluter Akzeptabilitätskriterien der Fall ist. Ebenso sind bei diesem Ansatz Modellunschärfen weniger relevant, da sie gleichermaßen in die vergleichende Betrachtung für den Untersuchungsfall wie auch den Referenzfall einfließen.

Vereinzelt finden sich heute auch Analyse- und Bewertungsansätze, die auch das individuelle Risiko von Tunnelnutzern als Bemessungsgröße verwenden; dieser Ansatz ist aber deutlich weniger verbreitet.

7.2.3 Weiterentwicklung des Risikobewertungsansatzes

Basierend auf den vorliegenden Auswertungen und Erkenntnissen zur bisherigen Anwendung der Methodik nach Heft B66 sowie der Analyse der in anderen Ländern etablierten methodischen Verfahren sind die nachfolgend dargestellten Weiterentwicklungen zur Risikobewertung vorgesehen:

- Die Risikobewertung wird entsprechend der ursprünglich in Heft B66 vorgeschlagenen Übergangslösung festgesetzt.
- Die Bewertung der Risiken erfolgt auf Basis eines relativen Vergleichs der kollektiven Risiken für den spezifisch zu untersuchenden Tunnel und dem Referenzfall eines vollständig richtlinienkonformen Tunnels (RABT/EABT).
- Die Bewertung erfolgt gesondert für die beiden Gefahrentypen „Kollision (ohne Brand)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“.
- Das Sicherheitsniveau des untersuchten Tunnels ist dann hinreichend bzw. akzeptabel, wenn die je Gefahrentyp ermittelten Risiken kleiner oder höchstens gleich sind wie für den Referenzfall.

Grundsätzlich gilt, dass es sich bei dem Referenz-tunnel um einen theoretischen Tunnel handelt, der dem untersuchten realen Tunnel ähnlich ist, jedoch alle Anforderungen und Bedingungen der im konkreten Fall anzuwendenden Richtlinien bzw. Vorschriften vollständig erfüllt.

Ein Referenz-tunnel dient zur Ermittlung eines Referenzrisikoprofils, das zur Bewertung des Risikos eines realen Tunnels verwendet wird [23]. Dabei wird ein relativer Bewertungsansatz verfolgt, bei dem der Nachweis der Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus durch Relativvergleich mit einem Referenz-tunnel erfolgt. Durch die Verwendung eines relativen Bewertungsansatzes kann der Einfluss von Unschärfen auf das Bewertungsergebnis minimiert werden.

Bei der Definition des Referenz-tunnels sind (in Anlehnung an relevante Sicherheitsparameter gemäß EABT) die in Tabelle 1 angeführten Anforderungen zu berücksichtigen.

Der Fokus dabei liegt bei der Festlegung von Parametern für das Gros an Tunneln in Deutschland. Für Tunnel, die Sonderfälle darstellen, wird empfohlen, den Referenz-tunnel in Abhängigkeit des Untersuchungsziels individuell in Abstimmung mit relevanten Entscheidungsträgern festzulegen. Sonderfälle sind beispielsweise Tunnel, die bauliche bzw. strukturelle Eigenschaften besitzen, die über die Standards der RABT/EABT hinausgehen (z. B. 3 Tunnelröhren, 4 Fahrstreifen je Richtung, usw.) oder mit besonderen Umgebungsbedingungen (z. B. besondere meteorologische Verhältnisse).

Sicherheitsparameter	Referenztunnel
Tunnellänge	Tunnellänge(n) der Tunnelröhre(n) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Tunnelsystem: Anzahl der Tunnelröhren bzw. Betriebsart	Tunnelsystem im Grunde gleich wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, bestehend aus Betriebsart (Gegenverkehr/Richtungsverkehr) und der Anzahl Tunnelröhren. Bei Tunneln mit einem DTV in der 15-Jahres-Prognose von über 10.000 Kfz je Tag und Fahrstreifen ist ein Richtungsverkehrstunnel als Referenztunnel heranzuziehen. Bei Tunneln mit einem DTV in der 15-Jahres-Prognose von kleiner gleich 10.000 Kfz je Tag und Fahrstreifen ist ein Gegenverkehrstunnel als Referenztunnel heranzuziehen.
Anzahl der Fahrstreifen	Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch keinen Seitenstreifen.
Fahrstreifenbreite	Querschnittsausbildung gemäß EABT (Bild 5: Tunnelquerschnitte), jedoch ohne Seitenstreifen.
Bauart, Querschnittsgeometrie	Bauart und Querschnittsform (Gewölbe, Rechteck etc.) des zu untersuchenden Tunnels soll weitestgehend beibehalten werden. Durch abweichendes Tunnelsystem, Regelquerschnitt (kein Seitenstreifen), etc. kann die Querschnittsgeometrie vom zu untersuchenden Tunnel abweichen, sollte jedoch aus baulicher Sicht einen plausiblen Querschnitt darstellen. Der Mindestquerschnitt nach EABT (Bild 6) ist allenfalls einzuhalten.
Unterirdische Zu- und Abfahrten im Tunnel	Sofern der zu untersuchende Tunnel (IST-Tunnel) unterirdische Zu- und Abfahrten aufweist, so sind diese auch beim Referenztunnel anzusetzen. Die Zu- und Abfahrten im Referenztunnel sind jedenfalls richtlinienkonform (z. B. gemäß RAA) zu gestalten.
Längsneigung	Längsneigung(en) der Tunnelröhre(n) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch maximal 3 %.
Trassierung	Trassierung <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Verkehrsaufkommen	Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre (einschließlich der zeitlichen Verteilung) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel.
Anteil des Lkw-Verkehrs	Schwerverkehrsanteil (inkl. Busanteil) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch maximal 15 %.
Gefahr täglicher oder saisonaler Staubildung	Kein täglicher Stau infolge Verkehrsüberlastung, sowie keine saisonale Staubildung (deutliches Übersteigen des im Jahresdurchschnitt ermittelten täglichen Verkehrsaufkommens)
geschwindigkeitsbezogene Aspekte	Die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Tunnel ist entsprechend der Auslegungsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Tunnels zu wählen.
Merkmale der Zufahrtsstraßen	Keine besonderen Merkmale an den Zufahrtsstraßen
geografische und meteorologische Verhältnisse	Geografische und meteorologische Verhältnisse <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Lüftungssystem	Lüftungssystem bei Gegenverkehrstunneln gemäß EABT – Tabelle 7 entsprechend der jeweiligen Tunnellänge, wobei für Tunnel ab 600 m eine Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal zu wählen ist. Lüftungssystem bei Richtungsverkehrstunneln gemäß EABT – Tabelle 8 entsprechend der jeweiligen Tunnellänge, wobei für Tunnel ab 3.000 m eine Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal zu wählen ist.
Bemessungsbrandleistung	Bemessungsbrandleistung und Rauchgasmenge gemäß EABT – Tabelle 11 entsprechend der Lkw-Fahrleistung, wobei bei über 6.000 Lkw-km pro Tag und Röhre eine Brandleistung von 100 MW und eine Rauchgasmenge von 200 m ³ /s zu wählen ist.
Notausgangsabstand	Notausgangsabstand 300 m.
Sonstige Sicherheitseinrichtungen	Sonstige Ausstattung mit Sicherheitseinrichtungen gemäß EABT – Tabelle 3 in Abhängigkeit von der Tunnellänge.

Tab. 1: Festlegung von Sicherheitsparametern eines Referenztunnels

7.3 Modellebene – Häufigkeitsermittlung

7.3.1 Erkenntnisse aus Auswertungen der Ereignisdatenbank

7.3.1.1 Einleitung

Die Häufigkeit von Fahrzeugunfällen und -bränden kann aus langjährigen Ereignisstatistiken abgeleitet werden. Statistische Verfahren stehen hier im Gegensatz zu analytischen Verfahren klar im Vordergrund. Im Gegensatz dazu können Aussagen zum Schadenausmaß – vor allem für seltene Ereignisse mit großem Schadenausmaß – nicht primär auf statistischen Grundlagen basieren, sondern erfordern die Verwendungen von Modellen, mit welchen die maßgeblichen Prozesse (z. B. Brandentwicklung und Selbstrettung gefährdeter Tunnelnutzer) probabilistisch modelliert werden (vgl. Kapitel 7.5).

Im vorliegenden Kapitel wird ausgewertet, mit welcher Häufigkeit sich verschiedene Arten von Fahrzeugunfällen und Bränden in Tunneln der Bundesfernstraßen (BAB und Bundesstraßen) ereignen. Zudem wird dargestellt, welche Tunnelmerkmale einen maßgeblichen Einfluss auf die Häufigkeit dieser Ereignisse aufweisen.

7.3.1.2 Datengrundlagen

Um die erforderlichen Daten bezüglich der aufgetretenen Tunnelereignisse bundesweit einheitlich zu erfassen und statistisch auszuwerten zu können, wurde ein Ereignismeldebogen entwickelt, der seit dem Frühjahr 2008 eingesetzt wird. Er besteht aus zwei Teilen:

- Grunddaten pro Tunnel: Erfasst werden 32 Merkmale, u. a. die Zahl der Röhren, deren Gesamtlänge, die Verkehrsart (Richtungs- bzw. Gegenverkehr), die Zahl der Fahrstreifen pro Richtung, das Vorhandensein von verschiedenen Sicherheitsmaßnahmen (z. B. Seitenstreifen), die zulässige Höchstgeschwindigkeit, der DTV, der Schwerverkehrsanteil sowie spezielle Bauwerksmerkmale (z. B. das Vorhandensein von Zu- bzw. Abfahrten).
- Ereignismeldung pro meldepflichtiges Ereignis: Meldepflichtig sind alle Ereignisse innerhalb eines Tunnels von mindestens 400 m Länge, die zu einer Alarmierung von Ereignisdiensten oder einer Sperrung von mindestens einer Tunnelröhre führten. Diese Ereignisse werden anhand von

ca. 200 Merkmalen charakterisiert (je nach der Art des Ereignisses ist nur ein kleiner Teil der Merkmale zu erfassen). Die für die vorliegende Studie wichtigsten Merkmale umfassen:

- Zeit und Ort (Tunnelname, innerhalb bzw. außerhalb Tunnel, Lage in Bezug auf eine ggf. vorhandene Zu- bzw. Abfahrt);
- Ereignisart: Gliederung nach Fahrzeugunfall (mit Unterteilung nach verschiedenen Unfallarten), Fahrzeug- bzw. anderer Brand und andere Ereignisse;
- an einem Unfall beteiligte Fahrzeuge;
- Personenschäden (Gliederung nach Toten, Schwer- und Leichtverletzte) sowie Sachschäden an Fahrzeugen, dem Bauwerk sowie der Tunnelausrüstung.

Es werden auch Ereignisse erfasst, die sich außerhalb eines Tunnels zugetragen haben, solange diese im Zusammenhang mit einem Tunnel auftraten oder auf diesen einen Einfluss hatten. Für jeden Tunnel ab 400 m Länge im Zuge von Bundesfernstraßen sind durch die zuständigen Verwaltungsbehörden einmal jährlich folgende Daten an die BAST zu übermitteln:

- aktualisierte Grunddaten des jeweiligen Tunnels,
- ausgefüllte Ereignismeldung für jedes meldepflichtige Ereignis.

Die BAST sammelt die Grunddaten der Tunnel sowie alle Ereignismeldungen und zieht die Daten für Auswertungen in einer Access-Datenbank zusammen. Für Auswertungen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung stellte die BAST dem Forschungsnehmer diese Datenbank mit Stand vom 27.08.2020 zur Verfügung.

Der Datenumfang der Access-Datenbank kann durch folgende Zahl von Datensätzen zusammenfassend charakterisiert werden:

- 168 Tunnel, davon 156 mit Angabe des DTV für ein in der großen Mehrzahl der Fälle angegebenes Referenzjahr.
- 48.808 Ereignisse, die sich zwischen dem 20.04.06 und dem 29.02.20 zugetragen haben. Darunter befinden sich auch zahlreiche Bagatellereignisse, die weder eine Alarmierung von Ereignisdiensten noch eine Sperrung einer Tunnelröhre nach sich zogen, und die somit nicht

meldepflichtig sind (z. B. Ausfall von Leuchtmitteln); zudem wurden teilweise auch viele Stauereignisse erfasst. Die Zahl der erfassten Ereignisse pro Tunnel schwankt zwischen 1 und 3.500, was nicht allein durch das unterschiedliche Verkehrsaufkommen sowie unterschiedliche Tunnelmerkmale erklärbar ist, sondern klar auf unterschiedliche Erfassungskriterien hindeutet, vor allem was Bagatellereignisse bzw. Ereignisse mit eingeschränktem Verkehrsfluss betrifft. Die Zahl der erfassten Fahrzeugunfälle sowie -brände schwankt je nach Tunnel zwischen ca. 470 und 0, wobei es keine Hinweise gibt, dass diese uneinheitlich erfasst wurden.

In Bild 4 ist für jeden Tunnel die Zahl der erfassten Fahrzeugunfälle (x-Achse) sowie die Zahl der restlichen Ereignisse (y-Achse) dargestellt. Bei insgesamt 6 Tunneln werden keine Fahrzeugunfälle ausgewiesen; in allen Fällen ist jedoch mindestens ein anderes Ereignis erfasst. Es gibt somit keine klaren Hinweise, dass zu einzelnen Tunneln keine Ereignisse in die Accessdatenbank Eingang gefunden haben; für die Auswertungen werden deshalb keine Tunnel aufgrund fehlender Ereignisse ausgeschlossen.

7.3.1.3 Datenaufbereitung

Um statistische Auswertungen zur Häufigkeit von Fahrzeugunfällen bzw. -bränden vornehmen zu können, war es aus folgenden Gründen notwendig,

die Daten zu den Tunneln sowie Ereignissen in einem ersten Schritt aufzubereiten:

- Zentrale Grunddaten von Tunneln fehlen oder wurden nicht einheitlich erfasst. Der häufigste Fall von inkonsistenten Daten betrifft die Tunnellänge sowie die Zahl der Fahrstreifen (vgl. Tabelle 2), da sowohl in der Anleitung sowie der Excel-Vorlage des Ereignismeldebogens Hinweise

Bauwerksname	Anzahl Fahrstreifen gemäß Datenbank	mutmaßl. Anz. Fahrstreifen pro Richtung
Innsbrucker Platz	0	3
Tunnel Ortsteil Britz	0	2
Kappler-Tunnel	4	2
Schützenallee	2	2
Kappelberg	4	2
Einhausung Hösbach	0	3
Einhausung Prüfening	6	3
Eching	4	2
Tunnel Walberg	2	2
Tunnel Hopfenberg	2	2
Galerie Uhingen	2	2
Kronstiege-Nord		2

Tab. 2: Beispiele für inkonsistente bzw. fehlende Angaben zur Zahl der Fahrstreifen: Werte pro Röhre (gelb dargestellt), Summenwerte über zwei Röhren (grün dargestellt) und fehlende Angaben (rot markiert)

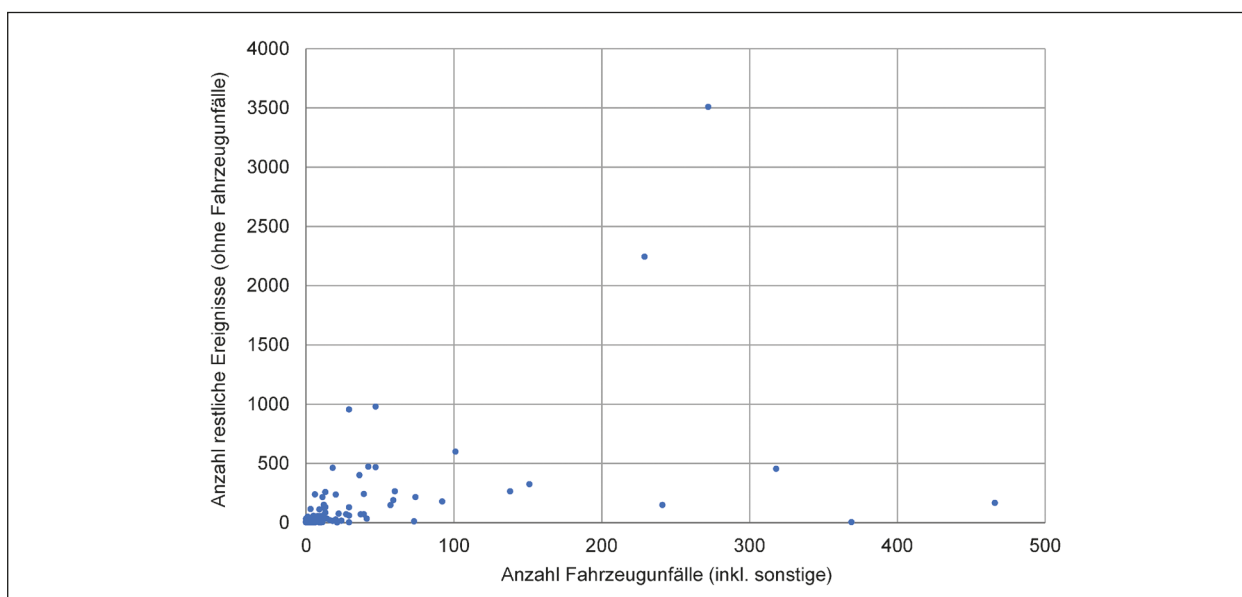


Bild 4: Anzahl erfasste Fahrzeugunfälle bzw. restliche Ereignisse pro Tunnel (links hineingezoomt in den Bereich Unfallzahlen unter 500)

fehlen, ob diese bei mehrröhri- gen Tunneln für eine einzelne Röhre anzugeben oder über alle Röhren zu summieren sind. Zudem sind verein- zelt Fehler bei der Verkehrsart festzustellen.

- Gemäß der Anleitung sind nur sechs un- terschiedliche Einträge zur Art des Unfalls zulässig, die über Auswahlfeld einzugeben sind. In Tat und Wahrheit kommen aber in der Access-Da- tenbank mehrere Tausend fehlende und mehre- re Hundert andere Einträge vor, vgl. Tabelle 3.

Ereignisart_Unfall	Anzahl Nennungen
Nein	23.133
	10.058
-	6.115
sonstige Unfälle	2.645
Auffahrunfall	2.569
Spurwechselunfall	2.328
Alleinunfall	1.237
Längsverkehr-Unfall	260
Sonstiger Unfall	117
unbekannt	115
Fahrunfall	69
Kollision mit Gegenverkehr	69
ja	39
Zusammenstoß (frontal)	28
Einbiegen/Kreuzen	11
Falschfahrer	1
und 14 weitere	

Tab. 3: Effektive Angaben zur Unfallart (Anzahl Einträge in der Access-Datei, links) und gemäß Anleitung zulässige Einträge über ein Auswahlfeld in der zur Datenerfas- sung genutzten Excel-Datei. Fehlende Angaben zur Unfallart sowie die Angabe „-“ wurden als „kein Unfall“ interpretiert.

Einträge, die nicht den Vorgaben entsprechen, wurden unter bestmöglicher Verwendung der vorliegenden Informationen den zulässigen Un- fallarten zugeordnet.

- Aus den Angaben zum Ereignisort kann nicht im- mer klar unterschieden werden, ob sich ein Er- eignis innerhalb des Tunnels oder außerhalb da- von zugetragen hat. Für alle Fahrzeugunfälle so- wie -brände wurde dies mittels eines zusätzli- chen Attributs (ja/nein-Wert) bestmöglich zuge- ordnet.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Datenbereini- gung aus Aufwandsgründen nur punktuell erfolgen konnte (Ergänzung fehlender und Korrektur von of- fensichtlich unplausiblen Tunnelmerkmalen, z. B. mehr als drei Fahrstreifen pro Röhre bei Richtungs- verkehrstunneln). Bei den Tunnel- sowie den Ereignis- daten wurden ausschließlich Merkmale geprüft und bei Bedarf korrigiert, welche für die vorgenom- menen Auswertungen als relevant erachtet wurden.

7.3.1.4 Übersicht Tunnelmerkmale und DTV

Die wichtigsten Merkmale, welche die Häufigkeit von Fahrzeugunfällen in Tunneln beeinflussen, sind neben dem DTV die Verkehrsart (Unterscheidung von Richtungsverkehrs- und Gegenverkehrstunnel) sowie das Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt. Die Zahl der Tunnel pro Merkmalskombination, zu- sätzlich gegliedert nach Straßentyp, ist in Tabelle 4 dokumentiert. Zusätzlich ist ersichtlich, ob Angaben zum DTV in der Access-Datenbank vorhanden sind. Die 24 Tunnel, zu denen DTV-Angaben fehlen, kön- nen bei Auswertungen der Unfallrate (Anzahl Unfäl- le pro Fahrzeug-km) nicht berücksichtigt werden.

Zu den 156 Tunneln, für die in der Access-Daten- bank DTV-Werte verzeichnet sind, wird in der Regel das Bezugsjahr angegeben, auf das sich der DTV bezieht. Um dem generellen Trend eines steigen- den Verkehrsaufkommens in den weiteren Auswer- tungen Rechnung zu tragen, wird wie folgt vorge- gangen:

- Auf Seite 107 von Ref. [42] ist der mittlere DTV auf BAB sowie Bundesstraßen zwischen 1996 und 2019 tabelliert.
- Ausgehend vom Referenzjahr des DTV wird für jedes Auswertejahr zwischen 2009 und 2019 der DTV mit dem aus der obigen Referenz abgelei- teten Hochrechnungsfaktor (z. B. 1,055 bzw. 1,026 für die Hochrechnung 2005 → 2015 bei

BAB bzw. Bundesstraßen) auf das jeweilige Jahr umgerechnet. Fehlt die Angabe des Referenzjahrs, so wird dafür 2011 angenommen (Mittelwert).

Die Fahrleistung in einem Tunnel wird schließlich ermittelt, indem der pro Auswertejahr hochgerechnete DTV über alle 11 Auswertejahre aufsummiert und mit der (mittleren) Länge einer Tunnelröhre multipliziert wird. Ist von einem Tunnel bekannt, dass er nach 2009 in Betrieb ging, so wird dies bei der Ermittlung der Fahrleistung berücksichtigt. In Bild 5 ist die kumulierte Fahrleistung nach Verkehrsart, DTV- und Längenklasse dargestellt. Es zeigt sich, dass

- lediglich 13 % der Fahrleistung in Tunneln auf Gegenverkehrstunnel entfallen;
- auf die 14 Tunnel (9 %), die eine Länge (eine Röhre) über 1,8 km aufweisen, 26 % der Fahrleistung (ohne Elbtunnel und ohne Berücksichtigung der Tunnel mit fehlenden DTV-Angaben) entfallen.

			Anzahl Verkehrstunnel auf...		
DTV-Angaben verfügbar	Verkehrsart	Zu- oder Abfahrt vorhanden	BAB	Bundesstraßen	allen Straßentypen
ja	Richtungsverkehr	nein	65	22	87
		ja	15	2	17
	Gegenverkehr	nein	2	49	51
		ja	0	1	1
nein	Richtungsverkehr	nein	3	3	6
		ja	1	2	3
	Gegenverkehr	nein	0	3	3
		ja	0	0	0

Tab. 4: Zahl der in der Access-Datenbank erfassten Tunnel gegliedert nach Verkehrsart, dem Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt sowie nach Straßentyp. Zudem ist ersichtlich, zu wie vielen Tunneln Angaben zum DTV in der Access-Datenbank vorhanden sind bzw. fehlen.

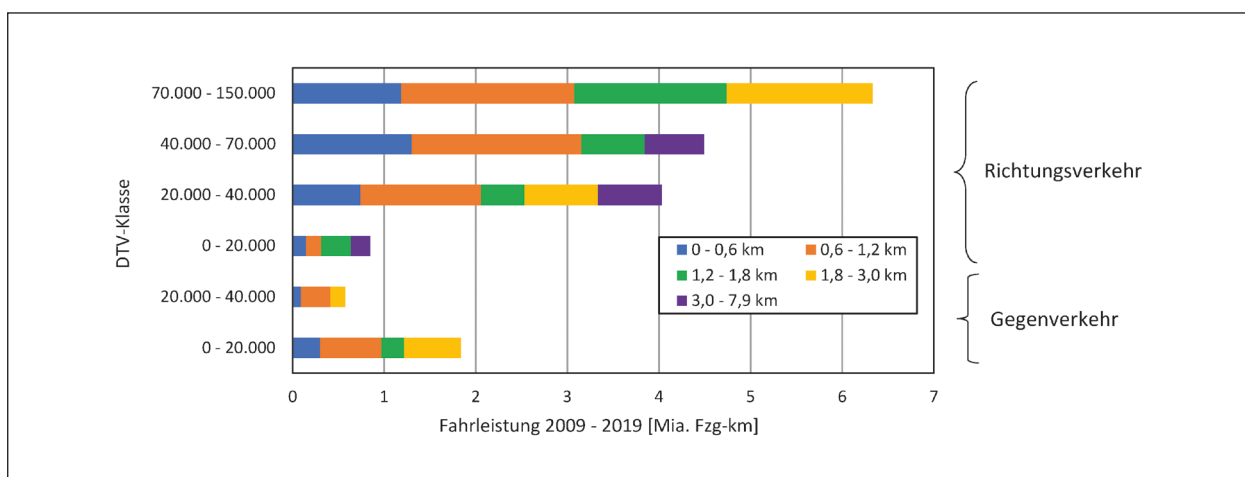


Bild 5: Kumulierte Fahrleistung über alle Tunnel in Abhängigkeit der Verkehrsart gegliedert nach 4 (Richtungsverkehr) bzw. 2 DTV-Klassen und 5 Längenklassen (ohne Berücksichtigung Elbtunnel sowie Tunnel ohne DTV-Angabe; DTV-Klasse basierend auf dem Wert für das Referenzjahr)

7.3.1.5 Trends bei der Zahl der Fahrzeugunfälle sowie -brände und Ort des Ereignisses

In Bild 6 ist die nach der Bereinigung der Unfallart resultierende zeitliche Verteilung der Zahl der Fahrzeugunfälle pro Unfallart dargestellt. Folgende Schlüsse können daraus gezogen werden:

- Die Jahre 2006, 2007 und 2008 sind nur sehr lückenhaft in der Datenbank enthalten, sodass diese nicht weiter betrachtet werden.
- Bei der jährlichen Zahl von Alleinunfällen, Spurwechselunfällen sowie Auffahrunfällen zeigt sich ein steigender Trend, der zumindest teilweise durch die Verkehrszunahme begründet sein dürfte.
- Aufgrund der geringen Zahl an Frontal-Zusammenstößen, die sich – seltene Fälle von Falschfahrern ausgeschlossen – nur in Gegenverkehrstunneln ereignen können, lässt sich hier kein signifikanter Trend ableiten.
- Die Zahl der sonstigen Unfälle zeigt einen uneinheitlichen Verlauf. Hier stellt sich zudem das Problem, dass die Zuordnung zu dieser Unfallart vermutlich je nach für die Datenerfassung zuständiger Behörde unterschiedlich erfolgt. Kritisch zu sehen ist auch der recht hohe Anteil von 34 % sonstigen Unfällen. Es ist zu vermuten, dass bei einer unklaren Zuordnung diese Unfallart verwendet wird. Statistische Auswertungen, die von der Gliederung in Unfallarten abhängen, sind in der Tendenz umso aussagekräftiger, je kleiner der Anteil von „sonstigen Unfällen“ ist.

Auffällig ist der Elbtunnel, da dort sämtliche Fahrzeugunfälle der Unfallart „diverse Unfälle“ zugeordnet sind. Mangels Angaben zur Unfallart und wegen der baustellenbedingt unterschiedlichen Betriebsarten einzelner Röhren (je nach Periode Betrieb im Richtungs- oder Gegenverkehr) wird der Elbtunnel nicht in die Auswertungen einbezogen, die im Kapitel 7.3.1.6 dargestellt sind.

Basierend auf einer linearen Trendkurve, welche an die Gesamtzahl aller Fahrzeugunfälle zwischen 2009 und 2019 gefittet wird, nahm deren Zahl in den 11 Jahren um etwa 80 % zu. Dies ist wesentlich höher als die Zunahme des DTV, der im gleichen Zeitraum in den untersuchten Tunneln gemäß Seite 107 von Ref. [42] im Mittel lediglich um etwa 10 % anstieg. Mit ca. 170 % noch deutlich ausgeprägter ist die Zunahme der Zahl der Unfälle, wenn die Unfallart „sonstige Unfälle“ nicht mitberücksichtigt wird. Eine Kombination folgender Gründe dürfte für die im Vergleich zum DTV überproportionale Zunahme der statistisch erfassten Zahl von Unfällen (Unfallhäufigkeit) verantwortlich sein:

- Vollständigere Erfassungen von Unfällen mit zunehmender Etablierung des Ereignismeldebogens, möglicherweise vor allem im Bereich der Bagatellunfälle;
- Zunahme bei Unfällen, die aus Interaktionen mehrerer Fahrzeuge resultieren, wobei vor allem Auffahr- und Spurwechselunfälle zahlenmäßig ins Gewicht fallen. Bei diesen Unfallarten ist zu erwarten, dass sie überproportional zum DTV

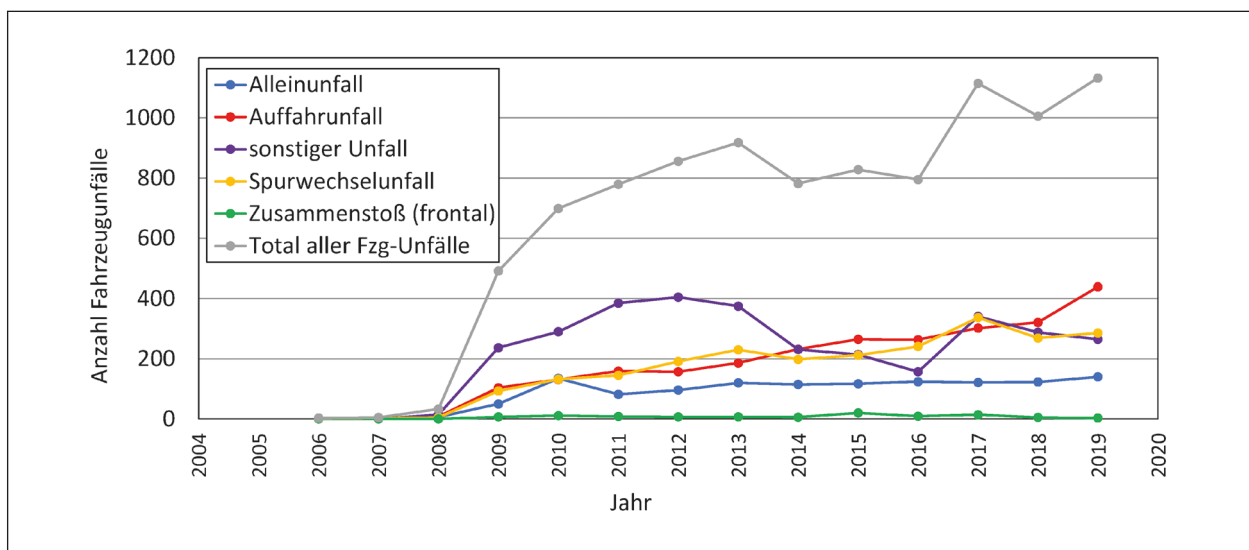


Bild 6: Entwicklung der jährlich erfassten Zahl an Fahrzeugunfällen in oder in der Nähe von Tunneln, gegliedert nach Unfallart

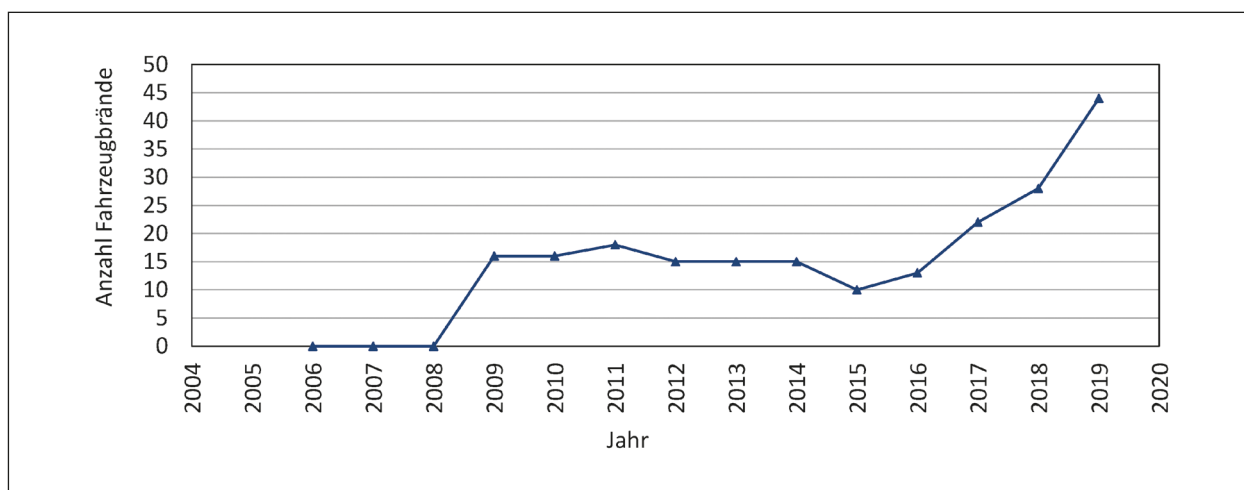


Bild 7: Entwicklung der jährlich erfassten Zahl an Fahrzeugbränden in oder in der Nähe von Tunneln

zunehmen (d. h. steigende Unfallrate mit steigendem DTV). Der deutlich steilere Anstieg der Kurven zu den beiden obigen Unfallarten im Vergleich zu Selbstunfällen weist klar auf nicht lineare Effekte hin.

In Bild 7 ist die zeitliche Verteilung der Zahl der Fahrzeugbrände dargestellt. Zwischen 2009 und 2016 ist kein signifikanter Trend ersichtlich (durchschnittlich 15 Brände/Jahr), zwischen 2016 und 2019 ist eine Zunahme auf gut 40 Brände pro Jahr erkennbar. Ein Grund für die Zunahme der Brände ist den Autoren der vorliegenden Forschungsarbeit nicht bekannt.

Von den insgesamt 212 erfassten Bränden traten 24 als Folge eines Fahrzeugunfalls auf. Bezogen auf die Gesamtheit von 9.402 Fahrzeugunfällen zwischen 2009 und 2019 bedeutet dies, dass lediglich 0,25 % aller Fahrzeugunfälle einen Brand nach sich zieht.

Die obigen Zahlen betreffend Fahrzeugunfälle bzw. -brände umfassen sowohl Ereignisse, die sich innerhalb eines Tunnels zugetragen haben, als auch solche außerhalb, sofern das Ereignis gemäß der mit der Erfassung betrauten Person in einem direkten Zusammenhang mit dem Tunnelbauwerk stand. Die Aufteilung nach dem Unfall- bzw. Brandort ist in Bild 8 dargestellt. Im Mittel ereignen sich 45 % aller tunnelbezogenen Ereignisse innerhalb eines Tunnels; bei den Fahrzeugbränden beträgt der entsprechende Wert 38 %.

Die folgenden Auswertungen basieren weitgehend auf der Unfallrate, d. h. dem Quotienten zwischen der Zahl der Unfälle und der zugrunde liegenden

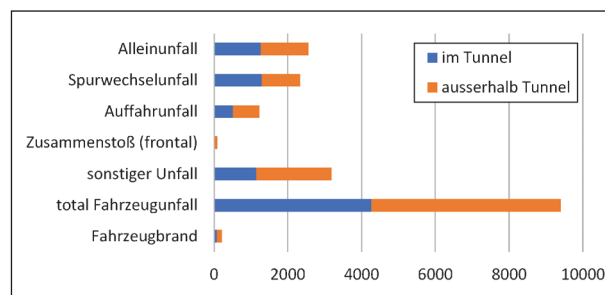


Bild 8: Anzahl Fahrzeugunfälle bzw. -brände gegliedert nach Unfallort (innerhalb bzw. außerhalb des Tunnels)

Fahrleistung. Um die Fahrleistung korrekt ermitteln zu können, werden im Folgenden nur noch Fahrzeugunfälle im Innern von Tunneln betrachtet (wie oben festgehalten ohne Berücksichtigung des Elbtunnels sowie der 24 Tunnel mit fehlenden DTV-Angaben).

7.3.1.6 Unfallraten und Abhängigkeit von Tunnelmerkmalen

Der Einfluss unterschiedlicher Merkmalskombinationen von Tunneln auf die mittlere Unfallrate sowie den Beitrag der fünf verschiedenen Unfallarten (Auffahr-, Spurwechsel- und Alleinunfall, frontaler Zusammenstoß und „sonstiger Unfall“) wird in Anhang A2 anhand von Abbildungen dargestellt. Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst, wobei der Fokus auf die relativen Unterschiede bei den Unfallraten gelegt wird (für Absolutwerte vgl. Anhang A2).

Die wichtigsten Ergebnisse der Analyse der mittleren Unfallraten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Zu- bzw. Abfahrten haben einen signifikanten Einfluss auf die Unfallrate. Richtungsverkehrstunnel, welche eine Zu- bzw. Abfahrt haben, weisen Unfallraten auf, die gut doppelt so hoch sind wie bei einem Fehlen einer solchen. Der Unterschied dürfte umso ausgeprägter sein, je größer die Zahl der Fahrstreifen und je kürzer der Tunnel ist. Grund für die erhöhte Unfallrate sind vor allem Spurwechselunfälle, in etwas geringerem Masse auch Auffahrunfälle.
2. Richtungsverkehrstunnel mit 3 Fahrstreifen weisen Unfallraten aus, die gut doppelt so hoch sind wie im Falle von 2 Fahrstreifen. Auch hier sind es primär Auffahr- und Spurwechselunfälle, welche diesen Unterschied verursachen. Bei dreistreifigen Richtungsverkehrstunneln werden zudem überdurchschnittlich viele Fahrzeugunfälle der Gruppe „sonstige Unfälle“ zugeordnet. These: Bei vielen könnte es sich um Auffahr- oder Spurwechselunfälle handeln; Unklarheiten bei der Unterscheidung dieser beiden Unfallarten könnten dazu führen, dass die Unfälle als „sonstige“ erfasst werden.
3. Gegenverkehrstunnel weisen gemäß den aktuellen Auswertungen Unfallraten aus, die im Mittel um etwa 35 % tiefer sind als Richtungsverkehrstunnel ohne Zu-/Abfahrt. Der Grund dürfte primär darin liegen, dass Gegenverkehrstunnel in aller Regel nur einen Fahrstreifen pro Richtung aufweisen, was zu einem geringeren Stellenwert von Auffahr- und Spurwechselunfällen führt (vgl. Punkt 2).
4. Ab etwa 10.000 Fahrzeugen pro Tag und Fahrstreifen steigt die Unfallrate in etwa proportional zu dieser Zahl an. Der Grund liegt in einer deutlichen Zunahme der Auffahr- und Spurwechselunfälle (sowie der sonstigen Unfälle); die Zahl der Alleinunfälle nimmt gleichzeitig ab.
5. Die über die gesamte Tunnellänge ermittelte durchschnittliche Unfallrate nimmt mit zunehmender Tunnellänge ab. Gemäß verschiedenen Untersuchungen dürfte der Grund darin liegen, dass im Portalbereich Unfälle – vor allem Auffahr- oder Spurwechselunfälle – gehäuft auftreten. Die Längenabhängigkeit der Unfallhäufigkeit ergibt sich somit aus einem konstanten Beitrag und einem solchen, der proportional zur Tunnellänge zunimmt.
6. Mit zunehmendem Schwerverkehrsanteil nimmt die Unfallrate tendenziell ab; dies zeigt sich an den Auffahr- und Spurwechselunfällen sowie bei den „übrigen Unfällen“. Eine mögliche Erklärung ist, dass mit bei einem höheren Schwerverkehrsanteil die Zahl der Spurwechsel abnimmt, da der Fahrstreifen ganz rechts zunehmend nur noch vom Schwerverkehr befahren wird. Die Abnahme gilt nur bezüglich der Häufigkeit von Unfällen; beim zugehörigen Schadenausmaß (und vermutlich auch beim kollektiven Risiko) ist mit steigendem Schwerverkehrsanteil eine Zunahme zu erwarten. Da es auch Studien gibt, die mit zunehmendem Schwerverkehrsanteil steigende Unfallraten ausweisen, wird im Folgenden angenommen, dass der Schwerverkehrsanteil keinen signifikanten Einfluss auf die Unfallrate aufweist.
7. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Vorhandensein eines Seitenstreifens und der Unfallrate lässt sich auf Basis der aktuellen Daten und Auswertungen nicht aufzeigen. Dies ist nicht weiter erstaunlich, dient doch ein Seitenstreifen primär dazu, bei Pannen und gegebenenfalls kleineren Unfällen die betroffenen Fahrzeuge so abzustellen, dass der Verkehrsfluss möglichst wenig gestört wird. Ein Seitenstreifen hat somit primär eine Relevanz für die Folgen eines Unfalls; ein Einfluss – etwa auf Folgeunfälle infolge einer pannenbedingten Störung im Verkehrsfluss – ist zwar grundsätzlich zu erwarten, aber statistisch nicht nachweisbar.
8. Auch zwischen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Unfallrate lässt sich auf der vorliegenden Datenbasis kein statistisch signifikanter Zusammenhang aufzeigen. Auch dies ist nicht unerwartet, ist doch eine Geschwindigkeitsbeschränkung primär ein Mittel, um verschiedenste Einflüsse auf die Fahrsicherheit (z. B. vergleichsweise enge Kurvenradien, reduzierte Fahrstreifenbreite), die bei der Auswertung von Unfallraten nicht berücksichtigt werden können, zu kompensieren. Um den Effekt unterschiedlicher Höchstgeschwindigkeiten statistisch zu erfassen, müsste eine Gruppe von Tunnel während längerer Zeit mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten, aber unter ansonsten gleichen Randbedingungen betrieben werden; solche Daten stehen jedoch nicht zur Verfügung.

Unfallort	Anzahl Tote	Anzahl Unfälle				
		Alleinunfall	Auffahrunfall	sonstiger Unfall	Spurwechselunfall	Zusammenstoß (frontal)
im Tunnel	0	508	1.270	1.151	1.302	32
	1	5	1	2	0	2
	2 – 3	0	1	0	0	0
	4 – 9	0	0	0	0	0
außerhalb Tunnel	0	795	1.283	2.927	1.931	54
	1	5	5	6	1	9
	2 – 3	0	0	1	0	0
	4 – 9	0	0	1	0	0

Tab. 5: Anzahl Unfälle gegliedert nach Unfallort, Anzahl Todesopfer und Unfallart

7.3.1.7 Einbezug der Unfallschwere

In Anhang A3 sind Auswertungen dargestellt, in welchen die Unfallschwere mitberücksichtigt wird. Dabei wird unterschieden zwischen Unfällen ohne Verletzte, solchen, die höchstens Leichtverletzte gefordert haben und solchen, die mindestens einen Schwerverletzten zur Folge hatten.

Die Auswertungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Etwa 10 % der Auffahr- und Spurwechselunfälle fordern mindestens einen Leichtverletzten. Bei Frontalzusammenstößen ist der entsprechende Anteil mit 44 % erwartungsgemäß deutlich höher. Bei Alleinunfällen sowie sonstigen Unfällen liegt dieser Anteil dazwischen.
- Bei Unfällen in Richtungsverkehrstunneln fordern gut 10 % mindestens einen Leichtverletzten. Bei Gegenverkehrstunneln ist dieser Anteil etwa doppelt so groß.
- Schließt man Bagatellunfälle ohne Verletzte aus, so resultieren für Richtungs- und Gegenverkehrstunnel vergleichbare Unfallraten (d. h. die Unterschiede sind deutlich kleiner, als wenn Bagatellunfälle in der Unfallrate einbezogen sind). Auch der Einfluss von Zu-/Abfahrten ist kleiner, wenn Bagatellunfälle ausgeschlossen werden. Der Grund liegt darin, dass sich Unterschiede primär bei Auffahr- und Spurwechselunfällen zeigen und diese einen überdurchschnittlich hohen Anteil an Bagatellunfällen ohne Personenschäden aufweisen.

In Tabelle 5 ist die Zahl der Unfälle dargestellt, bei denen die Zahl der Todesopfer in eine definierte

Klasse fällt. Insgesamt ereigneten sich in der Auswerteperiode von 11 Jahren 11 Unfälle innerhalb eines Tunnels mit mindestens einem Todesopfer. Dazu kommen 28 solche Unfälle außerhalb des Tunnels (aber mit einem Bezug zu einem nahe gelegenen Tunnel). Zwei oder mehr Todesopfer waren bei insgesamt drei Unfällen zu verzeichnen (davon 2 außerhalb des Tunnels). Der folgenreichste Unfall kostete acht Fahrzeuginsassen das Leben.

7.3.1.8 Vergleich mit anderen Ergebnissen und Parameterwerten gemäß Heft B66

Ergebnisse gemäß Heft B66

In Tabelle 6 ist ein Vergleich dargestellt zwischen dem aktuellen Zwischen-Ergebnis der vorliegenden Forschungsarbeit und den entsprechenden Ergebnissen aus Heft B66 (Ref. [5]). Dabei geht es um die mittleren Unfallraten nach Verkehrsart sowie dem Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt.

Der Vergleich zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung bei den Richtungsverkehrstunneln, bei denen die aktuellen Wert um etwa 30 % tiefer sind als die im Jahr 2007 ausgewiesenen Werte. Mit einem Faktor von etwa 7 ausgesprochen groß ist hingegen der Unterschied bei den Gegenverkehrstunneln. Es ist nicht einfach, eine schlüssige Begründung für diese grosse Differenz anzugeben. Die gemäss aktueller Auswertung deutlich tieferen Werte für Gegenverkehrstunnel erscheinen jedoch aus folgenden Gründen als plausibel:

- Sämtliche 44 Gegenverkehrstunnel, die hinsichtlich der Unfallrate ausgewertet wurden, wei-

Verkehrsart	Zu-/Abfahrt	Unfallrate pro Fahrzeug-km		Quotient
		Auswertung gemäß Heft B66	aktuelle Auswertung (2009 – 2019)	
Richtungsverkehr	mit	5,3 E-7	3,3 E-7	0,63
	ohne	2,3 E-7	1,6 E-7	0,72
Gegenverkehr	mit	9,8 E-7	1,1 E-7	0,11
	ohne	6,8 E-7	9,9 E-7	0,14

Hinweis:
Der Wert zur Merkmalskombination „Gegenverkehr mit Zu- / Abfahrt“ basiert auf lediglich einem Tunnel und ist somit nicht statistisch belastbar.

Tab. 6: Vergleich der Unfallraten gemäß Auswertung in Heft B66 (Analyse aus dem Jahr 2007) und der Auswertung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit (Tunnelunfälle 2009 – 2019).

sen lediglich einen Fahrstreifen pro Richtung aus.²

- Richtungsverkehrstunnel weisen praktisch ohne Ausnahme zwei oder drei Fahrstreifen pro Richtung auf. Je grösser die Zahl der Fahrstreifen ist, desto grösser ist erfahrungsgemäss auch die Zahl der Unfälle, was sich in einem relativ hohen Anteil von Spurwechselunfällen zeigt. Gleiches gilt für Auffahrunfälle, die sich in der Praxis bzw. bei der Unfallfassung nicht immer klar von Spurwechselunfällen unterscheiden lassen.
- Es ist deshalb nachvollziehbar, dass Gegenverkehrstunnel mit einem Fahrstreifen pro Richtung im Mittel eine tiefere Unfallrate ausweisen als mehrstreifige Richtungsverkehrstunnel.

Basierend auf den Werten in Tabelle 5 kann die Wahrscheinlichkeitsverteilung für definierte Ausmassklassen ermittelt werden. Um einen Vergleich mit Tabelle 4 im Heft B66 vornehmen zu können, werden die in der Ereignisstatistik verwendeten Unfallarten den Unfalltypen gemäß Heft B66 zugeordnet. Die Zuordnung aus Tabelle 7 wird verwendet.

Der Unfalltyp 3 (Einbiegen/Kreuzen) lässt sich in Tunneln, wo Fahrstreifen nicht senkrecht aufeinander zulaufen, sondern parallele Fahrstreifen sich vereinen, nicht sinnvoll unterscheiden vom Unfalltyp 6 (Unfall im Längsverkehr), da hier der Übergang fließend ist. Die Unfallarten „Auffahrunfall“,

„Spurwechselunfall“ und „Zusammenstoß (frontal)“ werden deshalb dem „kombinierten“ Unfalltyp 3/6 zugeordnet. Damit ergibt sich aus den Zahlen in Tabelle 5 die Ergebnisse gemäß der Struktur von Tabelle 4 in Heft B66, vgl. Tabelle 8).

Es ist zu betonen, dass die Werte in der 3. bis 5. Spalte in Tabelle 8 rein statistisch abgeleitet sind und für seltene Ereignisse, deren Wiederkehrperiode grösser ist als der Auswertezitraum (z. B. Unfälle mit mehr als 10 Todesopfern), deshalb eine Wahrscheinlichkeit von 0 ausgewiesen wurde, obwohl die effektive Eintrittswahrscheinlichkeit natürlich grösser als 0 ist.

Gemäss Ereignisstatistik ereigneten sich während der Auswerteperiode von 11 Jahren insgesamt 4.274 Unfälle in Tunneln (sowie 7.018 außerhalb von solchen).³ Angesichts der Abschätzungen, die den Werten in Heft B66 zugrunde liegt, weist nur einer von 10.000 Unfällen ein Schadensausmass von ≥ 4 Todesopfer auf ($p = 0,01011\%$). Deren Zahl ergäbe sich somit zu 0,43 (innerhalb von Tunneln) bzw. 0,70 (außerhalb von solchen). Dass sich in 11 Jahren kein Unfall mit ≥ 4 Todesopfer zugetragen hat, ist somit nicht im Widerspruch zur Annahme in Heft B66, dass einer von 10.000 Unfällen ein Schadensausmass von ≥ 4 Todesopfer aufweist. Insgesamt stimmt die Wahrscheinlichkeitsverteilung gemäß Heft B66 (Spalte ganz rechts in Tabelle 8) gut mit den in der vorliegenden Studie ausgewiesenen Ergebnissen überein.

² Drei Gegenverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen pro Richtung konnten wegen fehlender Angaben zum DTV nicht ausgewertet werden.

³ Diese Zahlen beinhalten auch Unfälle in Tunneln, für die keine Werte zum DTV vorliegen, und die deshalb für die Ermittlung der Unfallraten nicht herangezogen werden konnten. Die Zahl der Unfälle für die Ermittlung der Unfallraten ist deshalb kleiner.

Unfallart gemäß Ereignisstatistik	Unfalltyp gemäß Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen
Alleinunfall	Unfalltyp 1
Auffahrunfall	Unfalltyp 6
Spurwechselunfall	Unfalltyp 6 (evtl. teilweise Unfalltyp 3)
Zusammenstoß (frontal)	Unfalltyp 6 (bei Ein-/Ausfahrten) Unfalltyp 3 (außerhalb von Ein-/Ausfahrten)
Sonstiger Unfall	Unfalltyp 7

Tab. 7: Zuordnung zwischen den Unfallarten in der Ereignisstatistik und den Unfalltypen gemäß Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen

		nur Ereignisse in Tunneln	nur Ereignisse außerhalb Tunnel	alle Ereignisse	Werte gemäß Heft B66
Unfalltyp 1	Keine Todesopfer	99,03 %	99,38 %	98,07 %	99,25 %
	1 Todesopfer	0,97 %	0,63 %	1,93 %	0,59 %
	2-3 Todesopfer	0	0	0	0,15 %
	4-9 Todesopfer	0	0	0	0,01 %
	10-30 Todesopfer	0	0	0	0,0001 %
	> 30 Todesopfer	0	0	0	0,00001 %
Unfalltyp 3/6	Keine Todesopfer	99,85 %	99,54 %	99,28 %	99,50 %/99,00 %
	1 Todesopfer	0,12 %	0,46 %	0,69 %	0,42 % / 0,72 %
	2-3 Todesopfer	0,04 %	0	0,04 %	0,07 % / 0,27 %
	4-9 Todesopfer	0	0	0	0,01 %
	10-30 Todesopfer	0	0	0	0,0001 %
	> 30 Todesopfer	0	0	0	0,00001 %
Unfalltyp 7	Keine Todesopfer	99,83 %	99,73 %	99,14 %	99,50 %
	1 Todesopfer	0,17 %	0,20 %	0,69 %	0,42 %
	2-3 Todesopfer	0	0,03 %	0,09 %	0,07 %
	4-9 Todesopfer	0	0,03 %	0,09 %	0,01 %
	10-30 Todesopfer	0	0	0	0,0001 %
	> 30 Todesopfer	0	0	0	0,00001 %

Tab. 8: Schadenausmaßverteilung nach Unfalltypen: statistische Auswertungen anhand der Tunnelunfälle zwischen 2009 und 2019 im Vergleich zu den mit Schätzungen angereicherten Werten im Heft B66).

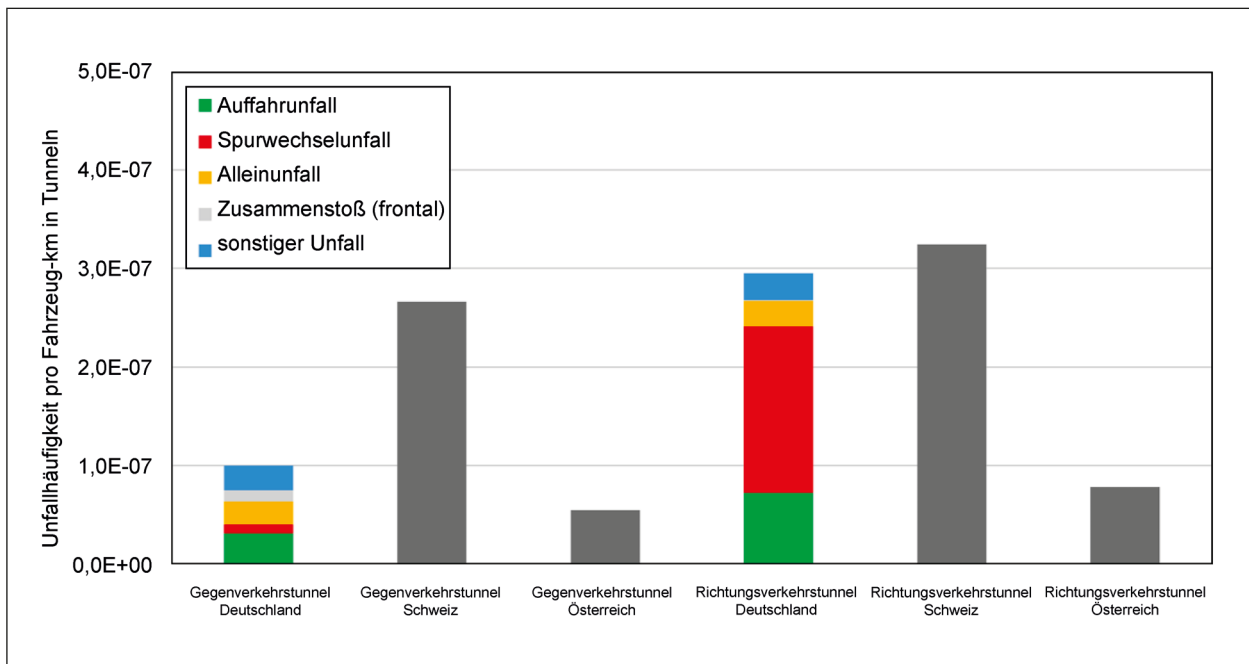


Bild 9: Vergleich der mittleren Unfallrate über die jeweils angegebene Zahl von Gegenverkehrs- bzw. Richtungsverkehrstunnel in Deutschland (Netz der BAB und Bundesstraßen) bzw. der Schweiz (Nationalstraßennetz)

Vergleich mit Unfallraten aus der Schweiz und Österreich

Um den obigen Vergleich mit weiteren Daten zu hinterlegen, wurden Unfallraten mit denen aus der Schweiz und Österreich verglichen, vgl. Bild 9. Der Vergleich mit den schweizer Werten zeigt, dass sich bei den Richtungsverkehrstunneln eine ausgesprochen gute Übereinstimmung der Werte zeigt, während bei den Gegenverkehrstunneln die Unterschiede mit rund einem Faktor 3 recht groß sind. Für den Vergleich mit den österreichischen Werten wurden die Basis-Unfallraten gemäß RVS 09.03.11 herangezogen, welche in der Methodik noch mit Faktoren für Verkehrsstärke, Tunnellänge und Verflechtungsstrecken multipliziert werden und somit stark von der Basisrate abweichen können. Nichtsdestotrotz, zeigt sich auch hier, dass die Unfallrate für Gegenverkehrstunnel kleiner ist als die für Richtungsverkehrstunnel. Dieser Effekt wird auch bei den neuen Werten im Adaptierungsvorschlag abgebildet.

7.3.1.9 Erkenntnisse aus der Auswertung von Fahrzeugbränden

Zwischen 2009 und 2019 ereigneten sich insgesamt 80 Fahrzeugbrände; davon ereigneten sich 4 (d. h. 5 %) in Gegenverkehrstunneln und 76 in Richtungsverkehrstunneln. Beim Vergleich dieser Zah-

len mit der Verteilung der Fahrleistung (13 % entfallen auf Gegenverkehrstunnel) zeigt sich, dass die Rate der Fahrzeugbrände in Gegenverkehrstunneln geringer ist als in Richtungsverkehrstunneln. Aus den Daten ist nicht ablesbar, ob dieses Ergebnis eher zufällig ist oder klar identifizierbare Gründe hat. Aus der etwas höheren Rate an Auffahr- und Spurwechselunfällen (sowie sonstigen Unfällen) in Richtungsverkehrstunneln leitet sich keine Erklärung für die höhere Brandrate ab.

Im Gegensatz zu Fahrzeugunfällen korrelieren Fahrzeugbrände, die zu deutlich über 99 % nicht als Folge eines Unfalls auftreten, praktisch nicht mit den oben diskutierten Tunnelmerkmalen. Typische Auslöser von Fahrzeugbränden wie gewisse technische Defekte, Leckagen an Öl- oder Kraftstoffleitungen, überhitzte Bremsen oder Motoren sowie Reifenschäden zeigen keinen Zusammenhang mit den Merkmalen von Tunneln, in denen ein Brand (zufällig) ausbricht. Folglich wird kein Versuch unternommen, solche Zusammenhänge aufzuzeigen (bzw. zu falsifizieren).

In der Access-Datenbank wird angegeben, welcher Fahrzeugtyp von einer Brand betroffen war und ob es sich um einen Teil- oder Vollbrand handelte. Die Verteilung der insgesamt 80 erfassten Brände nach diesen Merkmalen ist in Bild 10 dargestellt.

Unfallart	Anzahl Unfälle bzw. Ereignisse	davon Anzahl Unfälle bzw. Ereignisse				resultierende Wahrscheinlichkeit bzw. Raten		
		ohne Brand	mit Brand eines Pkw	mit Brand eines Lkw/Bus	mit sonstigem Brand	W'keit, dass Fahrzeug durch Unfall in Brand gerät	Rate Pkw-Brand [pro Pkw-km]	Rate Lkw-Brand [pro Lkw-km]
Auffahrunfall	1.272	1.268	3	1	0	0,31 %	2,5 E-10	4,7 E-10
Spurwechselunfall	1.302	1.301	0	1	0	0,08 %	6,3 E-11	4,7 E-10
Alleinunfall	513	511	1	0	1	0,19 %	6,3 E-11	0
Zusammenstoß (frontal)	34	33	1	0	0	2,94 %	6,3 E-11	0
Sonstiger Unfall	1.153	1.150	0	0	3	0,00 %	0	0
Kein Unfall	20.158	19.916	63	10	169	0,36 %	4,6 E-09	4,7 E-09
Alle Fahrzeugunfälle	4.274	4.263	5	2	4	0,16 %	4,4 E-10	9,3 E-10

Tab. 9: Kenngrößen zur Zahl der Unfälle, gegliedert nach Unfallart, sowie zu den daraus resultierenden Fahrzeug- und sonstigen Bränden. Zudem sind die resultierenden Brandwahrscheinlichkeiten bzw. -raten tabelliert. Zum Vergleich sind auch Brände aufgeführt, die ihre Ursache nicht in Unfällen haben.

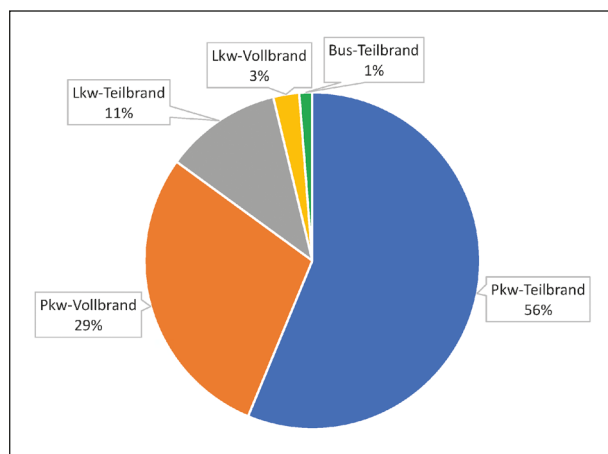


Bild 10: Gliederung der 80 Fahrzeugbrände zwischen 2009 und 2019 nach betroffenem Fahrzeug und Brandgröße

In Tabelle 9 sind die nach Unfallart gegliederte Zahl der Fahrzeugunfälle sowie die daraus resultierenden Fahrzeug- und sonstigen Brände aufgeführt. Zudem sind Brände aufgeführt, die nicht als Folge eines Unfalls auftraten. Ebenfalls dargestellt sind die Wahrscheinlichkeiten, dass infolge eines Unfalls ein Brand resultiert sowie die Pkw- und Lkw-Brandraten pro Fzg-km. Daraus lassen sich die folgenden Schlüsse ziehen:

- 73 von insgesamt 80 Fahrzeugbränden, d. h. gut 90 %, sind nicht eine Folge von Fahrzeugunfällen.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug infolge eines Unfalls in Brand gerät, liegt je nach Unfallart bzw. der zugehörigen mittleren Unfallsehre bei etwa 0,1 bis 3 %.

- Brandraten sind um mindestens einen Faktor 500 geringer als Unfallraten.⁴
- Die Brandraten sind für den Schwerverkehr um etwa einen Faktor 2 höher als für den Pkw-Verkehr.

7.3.1.10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Sicherstellung Datenqualität Ereignisdaten/Ereignismeldebogen

Grundsätzlich ist die Datenstruktur in Bezug auf die Tunnelbauwerke und die Ereignisse klar, übersichtlich und sehr umfassend. Angesichts der sehr großen Zahl von erfassten Attributen (32 für Tunnel, ca. 200 für die gesamte Palette der erfassten Ereignisse) erscheint eine Reduktion der Zahl der Merkmale bei den Ereignissen aus Praktikabilitätsgründen aber auch hinsichtlich einer Fokussierung auf relevante Informationen angezeigt. Hier stellt sich vor allem die Frage, zu welchen Ereignisarten – nebst Fahrzeugunfällen und -bränden, die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit untersucht werden – Auswertungen möglich sein sollen. Anstelle der heutigen Erfassungskriterien (Beteiligung von Einsatzdiensten oder Sperrung von mindestens einer Röhre) wäre es zielführend, anhand einer Positiv-

⁴ Basiswerte für diesen Vergleich: Unfallrate: $2,3 \cdot 10^{-7}$ pro Fzg-km (Mittelwert für Richtungsverkehrstunnel ohne Zu-/Abfahrt), Brandrate: $4,4 \cdot 10^{-10}$ (Pkw-Verkehr).

und Negativliste festzulegen, welche Ereignisarten (nicht) zu erfassen sind.

Beispiele für zu erfassende Ereignisse:

- Fahrzeugunfälle,
- Fahrzeugbrände
- Fahrzeugpannen (stehendes Fahrzeug auf Fahrbahn oder Seitenstreifen)
- Sperrung einer Tunnelröhre etc.

Beispiele für nicht zu erfassende Ereignisse:

- Stau, stockender Verkehr
- Ausfall von nicht unmittelbar sicherheitsrelevanten Bauteilen (inkl. Leuchtmittel)
- Fehlalarme von Geräten zur Tunnelüberwachung etc.

Um die Vollständigkeit und Qualität der Daten für statistische Auswertungen zu verbessern und diese zu vereinfachen, werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen:

- Daten zu den Tunnelbauwerken (einmalige Aktualisierung pro Jahr)
 - Ergänzung der Anleitung bzgl. der Erfassung von wichtigen quantitativen Merkmalen, die unterschiedlich festgehalten werden können. Dies betrifft insbesondere die Tunnellänge (Erfassung jeder einzelnen Röhre, keine Gesamtlänge), die Zahl der Fahrstreifen (Angabe pro Röhre, keine Gesamtzahl). Für die Erfassung von Daten, die von der Tunnelröhre abhängig sind, wäre u. U. eine obligatorische Gliederung nach „Teilbauwerken“ (Röhre 1 und 2, für Ausnahmefälle auch 3, 4 etc.).
 - Der DTV sollte mindestens alle 5 Jahre, besser alle 3 Jahre, erfasst werden, zusätzlich nach signifikanten Umbauten, welche eine der in diesem Kapitel betrachteten Merkmale betreffen.
 - Vollständigkeits- und Plausibilitätskontrolle bezüglich den wichtigsten ca. 20 Merkmalen (darunter alle hier erwähnten) durch eine zentral verantwortliche Stelle, ansonsten Rückweisung der Tunneldaten an den Erfasser.

• Ereignisdaten

- Für die Auswertung wichtige Typisierungen sollten konsequent bei der Datenerfassung erfolgen. Dies betrifft insbesondere folgende Ereignismerkmale:
 - Unfallart (allgemeiner: Ereignisart)
 - Ort des Ereignisses (innerhalb oder außerhalb des Tunnels)

Freitexteingaben sollten hier nicht zulässig sein und konsequent unterbunden werden.

- Es sollte geprüft werden, wie die Verwendung von „sonstige Unfälle“ reduziert werden kann. Ist dies eine Folge von Unklarheiten bei der Wahl zwischen zwei Alternativen, so ist es evtl. zielführender, konsequent die eine der beiden anzugeben (Bsp.: Unterschied zwischen Auffahr- und Spurwechselunfälle). Ggf. kann auch die Gliederung der Unfallarten angepasst werden (Zusammenfassung von Auffahr- und Spurwechselunfälle).
- Es sollte jährlich geprüft werden, ob Auffälligkeiten bei der Erfassung wichtiger Ereignismerkmale festzustellen sind. Ein Beispiel dafür ist die häufige (im Falle des Elbtunnels sogar ausschließliche) Verwendung der Unfallart „sonstige Ereignisse“.
- Eine Ereignisbeschreibung in einem Satz (bzw. mit Stichworten) ist zwar nicht systematisch auswertbar, gibt aber für den Auswertenden wichtige Anhaltspunkte, wie ein Ereignis einzuordnen ist und hilft, fehlende Merkmale im Nachhinein zu ergänzen. Wenn der Mehraufwand für die Erfassenden nicht klar dagegenspricht, sollte eine solche zukünftig festgehalten werden.
- Allenfalls können die für den Ablauf eines Ereignisses jeweils maßgeblichen Begleitumstände angegeben werden.
Bsp: Staubildung (falls diese einen Auffahr-unfall begünstigt hat).
Begleitumstände in diesem Sinne sind weder (meldepflichtigen) Ereignisse noch Ursachen von letzteren, sondern sollen helfen, den Kontext, den Ablauf, wichtige Randbedingungen etc. von Ereignissen besser zu beschreiben. Die Nennung mehrerer Begleitumstände aus einer längeren Liste (ggf. ergänzt um Freitext) kann helfen, auf eine Vielzahl fix vorgegebener Ereignismerkmale zu verzichten und somit deren Zahl zu reduzieren.

Mögliche vertiefte Analysen

Die hier vorgenommenen Analysen zur Häufigkeit von Fahrzeugunfällen beschränken sich auf die Analyse von mittleren Unfallraten für mehr oder weniger homogene Gruppen von Tunnel.

Eine deutlich anspruchsvollere, ergänzende Art der Analyse wäre eine „multi criteria analysis“. Dabei handelt es sich um ein mehrdimensionales Prüfen von Korrelationen von kontinuierlichen (z. B. Röhrenlänge, DTV pro Fahrstreifen, Höchstgeschwindigkeit, Anteil Schwerverkehr) und diskreten Tunnelmerkmalen (z. B. Verkehrsart, Zahl der Zu-/Abfahrten, Vorhandensein von Seitenstreifen) mit dem Ziel, eine analytische Formel abzuleiten, anhand derer für einen beliebigen Tunnel ein Schätzwert für die Unfallrate (pro Unfallart) ermittelt werden kann, der bestmöglich mit den statistischen Erfahrungswerten in Einklang steht. Die Ableitung einer solchen Beziehung basiert auf gewissen Annahmen (insbesondere hinsichtlich der Berücksichtigung kontinuierlicher Variablen, z. B. in Bezug auf funktionale Zusammenhänge), wobei die Güte des Modells durch Variation der Annahmen innerhalb gewisser Grenzen verbessert werden kann.

Eine solche Betrachtung würde es erlauben, Unterschiede in der Unfallhäufigkeit bzw. Rate zwischen einem realen Tunnel und dem zugehörigen Referenz-tunnel bestmöglich quantitativ abzuschätzen und einer Risikobewertung zugänglich zu machen. Aufgrund der im Forschungsvorhaben verfügbaren Zeit und Mittel war eine derartige Umsetzung jedoch nicht möglich. Der im folgenden Kapitel gewählte Ansatz, Basis-Unfallraten mittels Einflussfaktoren zu korrigieren, stellt eine alternative, methodisch einfachere Herangehensweise als eine „multi criteria analysis“ dar, welcher ebenfalls ausreichend gute Aussagen ermöglicht, jedoch etwas weniger belastbar sind und bei Bedarf angepasst werden müssten.

7.3.2 Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit

Das Unfallgeschehen in Straßentunneln wird durch zahlreiche geometrische und verkehrliche Faktoren beeinflusst. Ziel ist es daher bei der Ermittlung der Unfallhäufigkeit diese Einflussfaktoren mit einzubeziehen. Hierzu werden Unfallraten für Referenzfälle mit entsprechenden Korrekturfaktoren multipliziert. Grundlage für dieses Faktorenmodell bilden aus der Ereignisdatenbank abgeleitete Unfallraten für Richtungs- und Gegenverkehrstunnel. Als Basis-

werte dienen hierbei Unfallraten für die am häufigsten anzutreffenden Tunnelkonfigurationen. Dies sind Tunnel mit einer Länge von ≤ 600 m und 1 Fahrstreifen pro Fahrtrichtung im Fall von Gegenverkehrstunnel und 2 Fahrstreifen im Fall von Richtungsverkehrstunnel. Folgende Einflüsse werden hierbei über Korrekturfaktoren berücksichtigt:

- Zu-/Abfahrten
- Tunnellänge
- Fahrstreifenanzahl
- Fahrstreifenbreite
- Seitenstreifen
- Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen
- zulässige Geschwindigkeit
- Differenzgeschwindigkeit

Die Unfallhäufigkeit H_U bestimmt sich dann in Abhängigkeit von der Basis-Unfallrate, dem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen, der Tunnellänge sowie der Einflussfaktoren entsprechend des nachfolgenden Zusammenhangs:

$$H_U = \frac{UR \cdot DTV \cdot L \cdot 365}{10^6} \cdot f_{ZA} \cdot f_L \cdot f_{FS} \cdot f_{FSB} \cdot f_{SS} \cdot f_{DTV/FS} \cdot f_v \cdot f_{\Delta v}$$

Mit:

UR Basis-Unfallrate [Unfälle pro 10^6 Fzg-km]

DTV Durchschnittliches, tägliches Verkehrsaufkommen [Kfz/24 h]

L Tunnellänge [km]

fx Einflussfaktoren [-]

f_{ZA} Vorhandensein von Zu-/Abfahrten

f_L Tunnellänge

f_{FS} Fahrstreifenanzahl

f_{FSB} Fahrstreifenbreite

f_{SS} Seitenstreifen

$f_{DTV/FS}$ Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen

f_v zulässige Geschwindigkeit

$f_{\Delta v}$ Differenzgeschwindigkeit

Die Korrekturfaktoren zu den in der obigen Aufzählung kursiv dargestellten Einflüssen lassen sich

grundsätzlich aus der Unfallstatistik ableiten. Aus den vorstehend genannten Gründen ist eine umfassende und alle Einflussfaktoren berücksichtigende mathematische Ableitung mittels einer „multi criteria analysis“ nicht durchführbar. Stattdessen werden die Faktoren unter Bezugnahme zu den ausgewiesenen mittleren Unfallraten auf der Basis mathematischer Vereinfachungen und Expertenschätzungen in Einklang mit der Unfallstatistik ermittelt.

7.3.2.1 Basis-Unfallraten (UR) (für Tunnel ohne Zu-/Abfahrten)

Grundlage für die Ermittlung der Basis Unfallraten für Tunnel ohne Zu- und Abfahrten bilden die in der Ereignisdatenbank enthaltenen Unfälle. Darüber lassen sich Unfallraten für Richtungs- und Gegenverkehrstunnel ermitteln. Hierbei zeigt sich, dass Richtungsverkehrstunnel eine etwas höhere Unfallrate als Gegenverkehrstunnel aufweisen. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse aus der Unfallanalyse enthält Tabelle 10.

In der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 wird für Richtungsverkehrstunnel eine Basis-Unfallrate von 2,3 bzw. für Gegenverkehrstunnel einen Basis-Unfallrate von 6,8 angesetzt (siehe auch Tabelle 6).

7.3.2.2 Einflussfaktor Zu-/Abfahrt ($f_{Z/A}$)

Im Bereich von Zu- und Abfahrten treten infolge von Spurwechsel- und Verzögerungsvorgängen vermehrt Konfliktsituationen zwischen einzelnen Fahrzeugen auf. Dies spiegelt sich auch in einer erhöhten Unfallrate gegenüber Tunnel ohne Zu- und Abfahrten wider. Gegenüber Gegenverkehrstunneln ist in Richtungsverkehrstunneln eine geringere Zunahme an Unfällen durch Zu- und Abfahrten zu verzeichnen. In Tabelle 11 sind die auf Basis der Ereignisdatenbank ermittelten Faktoren zur Berücksichtigung des Einflusses von Zu- und Abfahrten in Tunneln zusammengefasst.

In der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 wird für Richtungsverkehrstunnel mit einer Zu-/Abfahrt ein Erhöhungsfaktor von 2,3 bzw. für Gegenverkehrstunnel ein Faktor von 1,44 angesetzt (siehe auch Tabelle 6).

7.3.2.3 Einflussfaktor Tunnellänge (f_L)

Die Analyse der Unfälle aus der Ereignisdatenbank hat ergeben, dass die Unfallrate mit zunehmender

Unfallrate [Unfälle pro 10 ⁶ Fzg-km]	
RV-Tunnel	GV-Tunnel
UR _{RV}	UR _{GV}
0,16	0,10

Tab. 10: Basis-Unfallraten

Zu-/Abfahrt vorhanden	Zu-/Abfahrtfaktor $f_{Z/A}$	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{F/A,RV}$	$f_{Z/A,GV}$
nein	1,00	1,00
ja	1,60	2,00

Tab. 11: Zu-/Abfahrtfaktor $f_{Z/A}$

Tunnellänge	Längenfaktor f_L	
	Tunnel ohne Zu-/Abfahrt	Tunnel mit Zu-/Abfahrt
	$f_{L,ohneZ/A}$	$f_{L,ohneZ/A}$
0 – 600 m	1,00	1,00
601 – 1.200 m	0,70	0,90
1.201 – 1.800 m	0,40	0,80
1.801 – 3.000 m	0,35	0,78
> 3.000 m	0,30	0,76

Tab. 12: Längenfaktor f_L

Tunnellänge signifikant abnimmt. Begründet werden kann dieser Effekt mit der Gewöhnung an die veränderten Verhältnisse innerhalb der Tunnelstrecke. Mit zunehmender Tunnellänge verflacht jedoch die Abnahme in der Unfallrate bzw. -häufigkeit. Im Fall von Tunneln mit Zu- und Abfahrten ist ein geringerer Abfall in der Unfallhäufigkeit zu verzeichnen. Eine Zusammenstellung der auf Basis der Unfallauswertung ermittelten Faktoren zur Berücksichtigung des Längeneinflusses enthält Tabelle 12.

Der Einfluss der Tunnellänge auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.4 Einflussfaktor Fahrstreifenanzahl (f_{FS})

Je mehr Fahrstreifen innerhalb eines Querschnittes vorhanden sind, desto mehr Konfliktmöglichkeiten ergeben sich zwischen den einzelnen Fahrzeugen und desto komplexer wird der Verkehrsfluss, insbe-

Anzahl Fahrstreifen je Fahrtrichtung	Fahrstreifenfaktor f_{FS}	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{FS,RV}$	$f_{FS,GV}$
1	0,70	1,00
2	1,00	1,50
3	1,30	-
4	1,50	-

Tab. 13: Fahrstreifenfaktor f_{FS} (der Fall von 4 Fahrstreifen pro Richtung gibt es derzeit in der Praxis nicht, deshalb die Verwendung der kleineren Schrift)

sondere bei mäßigem bis hohem Verkehrsaufkommen und größeren Differenzgeschwindigkeiten. Die Analyse der Unfälle aus der Ereignisdatenbank zeigt eine Zunahme der Unfälle mit steigender Anzahl an Fahrstreifen. Die relative Erhöhung der Unfallrate nimmt jedoch mit jedem weiteren Fahrstreifen ab. Die Datengrundlage ermöglicht eine Differenzierung nach Richtungs- und Gegenverkehrstunnel. Die daraus abgeleiteten Faktoren sind in nachfolgender Tabelle 13 zusammengefasst.

Der Einfluss der Anzahl der Fahrstreifen auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.5 Einflussfaktor Fahrstreifenbreite (f_{FSB})

Aus verschiedenen Untersuchungen zur Verkehrssicherheit, wie beispielsweise FE 82.334/2007 [14] und FE 16.0012/2009 [15], ist bekannt, dass sich die Unfallgefahr mit Verringerung der Fahrstreifenbreite erhöht. Dieser Einfluss lässt sich über die in Tabelle 14 angegebenen Faktoren berücksichtigen. Den Bezug bildet hierbei eine Regelbreite von $\geq 3,50$ m.

Der Einfluss der Fahrstreifenbreite auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.6 Einflussfaktor Seitenstreifen (f_{SS})

Ein Seitenstreifen kann wesentlich dazu beitragen den Verkehrsfluss auch bei Störungen durch Pannen oder Unfällen aufrecht zu erhalten. Dadurch werden kritische Verkehrssituationen durch Spurwechsellvorgänge sowie durch Staubildung mit der Gefahr von Auffahrunfällen am Stauende reduziert. Darüber hinaus ermöglicht er einen größeren seitlichen Spielraum bei Fahrfehlern (Forgiving Roads).

Fahrstreifenbreite	Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB}
3,0 m < FS-Breite < 3,25 m	1,2
3,25 m < FS-Breite < 3,50 m	1,17
FS-Breite $\geq 3,50$ m	1,0

Tab. 14: Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB} (Quelle: BAST Heft V226)

Präsenz Seitenstreifen	Seitenstreifenfaktor f_{SS}
Kein Seitenstreifen	1,00
Mit Seitenstreifen	0,83

Tab. 15: Seitenstreifenfaktor f_{SS}

Dies gilt im Tunnel im gleichen Maß wie für die freie Strecke. Nach dem Handbuch für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen (HVS) [28] verringert sich die Unfallgefahr um ca. 27 % wenn ein Seitenstreifen vorhanden ist, was wiederum einem Faktor 0.83 im Faktorenmodell entspricht. Bis zum Vorliegen neuerer Erkenntnisse wird daher auch für Tunnelstrecken als Orientierung der Wert aus dem HVS [28] empfohlen. In seiner Wirkung, der Vergrößerung des seitlichen Spielraumes, entspricht ein Seitenstreifen vereinfacht betrachtet einer erhöhten Fahrstreifenbreite. Die vorgeschlagenen Faktoren sind insofern konsistent, als sich auch dort der Faktor 1,2 wiederfindet, vgl. Tabelle 14.

Der Einfluss eines Seitenstreifens auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.7 Einflussfaktor Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen ($f_{DTV/FS}$)

Mit zunehmender Auslastung der Fahrstreifen ist eine Zunahme in der Unfallhäufigkeit zu verzeichnen. Die Auswertung der Ereignisdatenbank hinsichtlich der Eintrittshäufigkeit von Unfällen in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens zeigt hierbei Unterschiede zwischen Tunneln im Richtungs- und Gegenverkehrsbetrieb. Während bei niedrigen Auslastungen nur ein geringfügiger Einfluss auf das Unfallgeschehen feststellbar ist, nimmt dieser mit zunehmender Auslastung sehr deutlich zu. In nachfolgender Tabelle 16 sind die daraus abgeleiteten Faktoren in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens pro Fahrstreifen zusammengefasst.

DTV pro Fahrstreifen	Faktor DTV/Fahrstreifen	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{DTV/FS,RV}$	$f_{DTV/FS,GV}$
0 – 6.000	0,95	1,00
6.001 – 12.000	1,00	1,05
12.001 – 18.000	1,50	1,55
> 18.000	2,00	-

Tab. 16: Verkehrsaufkommensfaktor

Der Einfluss des Verkehrsaufkommens auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.8 Einflussfaktor zulässige Geschwindigkeit (f_v)

Das Auftreten von Unfällen korreliert mit der zulässigen Geschwindigkeit. Je höher die Fahrgeschwindigkeit desto größer wird der Weg während der Reaktions- und Auswirkzeit sowie dem eigentlichen Bremsvorgang wodurch die Eintrittswahrscheinlichkeit von Unfällen zunimmt. Zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitseinflusses auf die Unfallhäufigkeit wird analog zum Vorgehen im Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln ein linearer Zusammenhang zugrunde gelegt. Bezug bildet hierbei die Unfallrate bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 80 km/h. Demgegenüber führen höhere zulässige Geschwindigkeiten zu einer Zunahme und niedrigere zulässige Geschwindigkeiten zu einer Abnahme der Unfallhäufigkeit. Der Zusammenhang zwischen Unfällen und Geschwindigkeiten beschreibt NILSSON [28] mit folgendem exponentiellen Ansatz (Power Model):

$$\frac{\text{Anzahl Unfälle nachher}}{\text{Anzahl Unfälle vorher}} = \left(\frac{\text{Geschwindigkeit nachher}}{\text{Geschwindigkeit vorher}} \right)^{\text{Exponent}}$$

Der gewählte lineare Ansatz zur Berücksichtigung des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Unfallhäufigkeit entspricht im Power Model einem Exponenten von 1. Das dargestellte Power Model wurde auf Basis einer großen Zahl statistischer Studien erstellt. Ein annähernd linearer Zusammenhang (Exponent 1,5) zwischen dem Verhältnis der Unfallhäufigkeiten (Unfälle mit Personenschaden) und dem Verhältnis der Fahrgeschwindigkeiten wurde dabei statistisch nachgewiesen [30]. Die Werte für eine zulässige Geschwindigkeit von 100 km/h und mehr stellen eine Extrapolation dar für den Fall, dass solche Werte zukünftig in der Praxis vorkommen.

Zulässige Geschwindigkeit	Geschwindigkeitsfaktor f_v
40 km/h	0,50
50 km/h	0,63
60 km/h	0,75
70 km/h	0,88
80 km/h	1,00
100 km/h	1,25
120 km/h	1,50
130 km/h	1,63

Tab. 17: Geschwindigkeitsfaktor f_v

Differenzgeschwindigkeit	Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$	
	Steigung	Gefälle
$0 \leq \Delta v < 5$ km/h	1,00	1,00
$5 \leq \Delta v < 10$ km/h	1,02	1,01
$10 \leq \Delta v < 15$ km/h	1,05	1,03
$15 \leq \Delta v < 20$ km/h	1,10	1,05
$\Delta v \geq 20$ km/h	1,20	1,10

Tab. 18: Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Unfallrate wird in der aktuell gültigen Bewertungsmethodik gemäß BAST-Heft B66 nicht berücksichtigt.

7.3.2.9 Einflussfaktor Differenzgeschwindigkeit ($f_{\Delta v}$)

Infolge unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten zwischen Pkw und Lkw bzw. beladenen und unbeladenen Lkw entstehen Auffahrsituationen, die bei einer Fehleinschätzung der Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug zu Unfällen führen können. Mit zunehmenden Differenzgeschwindigkeiten ist daher vermehrt mit Unfällen zu rechnen. Dieser Effekt tritt insbesondere in Steigungs- und Gefällestrassen auf. Zur Berücksichtigung des Einflusses der Differenzgeschwindigkeit auf die Unfallhäufigkeit dient der Faktor $f_{\Delta v}$. Dieser ist an die Vorgaben im Benutzerhandbuch des niederländischen Modells zur Durchführung von quantitativen Risikoanalysen für Straßentunnel angelehnt. Eine Zusammenstellung der Faktoren enthält Tabelle 18 gemäß [18] in Abhängigkeit von Differenzgeschwindigkeitsklassen getrennt für Steigungs- und Gefällestrassen.

Zul. Geschwindigkeit	Lkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,LKw}$ [km/h] in Abhängigkeit der Längsneigung												
	Gefälle [%]						Steigung [%]						
	- 6	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1	0	1	2	3	4	5	6
$V_{zul} \geq 80$ km/h	86	86	86	86	86	86	86	86	85	80	74	69	63
$V_{zul} = 70$ km/h	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	74	69	63
$V_{zul} = 60$ km/h	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	63
$V_{zul} = 50$ km/h	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55

Tab. 19: Lkw-Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Längsneigung (Quelle: RABT 2006, EABT 80/100)

Nachdem die Erhöhung der Unfallrate auf die Differenzgeschwindigkeit zwischen Pkw und Lkw bzw. zwischen unterschiedlichen Lkw zurückzuführen ist, wird der statistisch gegebene Einfluss auf die Unfallrate mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht nur von der Längsneigung der Fahrbahn, sondern ebenfalls vom Lkw-Anteil abhängen. Auf Basis der Ereignisdatenbank lässt sich der Einfluss des Gefälles jedoch nicht überprüfen. Die in Tabelle 18 angegebenen Werte beruhen daher auf Expertenschätzungen. Eine genauere Beschreibung des Einflusses des Gefälles, insbesondere in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils, ist auf Basis der reinen Expertenschätzung, ohne statistische Grundlage, nicht zielführend.

Ermittlung der Differenzgeschwindigkeiten Δv

Die Differenzgeschwindigkeiten Δv ergeben sich wie in nachfolgender Gleichung dargestellt aus der Differenz der Fahrgeschwindigkeiten von Pkw und Lkw.

$$\Delta v = v_{F,Pkw} - v_{F,Lkw}$$

Ermittlung der Fahrgeschwindigkeiten v_F

- Pkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,Pkw}$

Der Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit von Pkw wird die Annahme zugrunde gelegt, dass durch die Fahrzeugführer unabhängig von der Längsneigung eine Geschwindigkeit von 10 % über der zulässigen Geschwindigkeit gewählt wird. Die Pkw-Fahrgeschwindigkeit bestimmt sich somit wie folgt.

$$v_{F,Pkw} = 1,1 \cdot v_{zul}$$

- Lkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,Lkw}$

Die Fahrgeschwindigkeit von Lkw variiert in Abhängigkeit von der Längsneigung und der zulässigen Geschwindigkeit. Gemäß den RABT bzw. EABT 80/100 ergeben sich die in Tabelle 19 aufgeführten Fahrgeschwindigkeiten für Lkw.

7.3.3 Struktur des Ereignisbaumes/ Relative Häufigkeiten/Verzweigungen

Zur Häufigkeitsermittlung werden von einem auslösenden Ereignis (Unfall, Unfall mit Brandwirkung bzw. Technischer Defekt mit Brandwirkung) ausgehend alle möglichen Zwischenzustände bis hin zu den Endzuständen des Systems ermittelt und diese hinsichtlich ihrer zu erwartenden Häufigkeit quantifiziert. Vom auslösenden Ereignis aus werden die angeforderten Systemantworten (zum Beispiel die eines Sicherheitssystems) abgefragt, und es wird unterschieden, ob ein Erfolg oder ein Versagen vorliegt. An diesem Punkt verzweigt sich der Ereignisablauf in weitere Zwischenzustände. Die Zwischenzustände werden analog zu denen des auslösenden Ereignisses auf Systemantworten untersucht. So entstehen bis zum Erreichen eines Endzustandes unterschiedliche Zweige des Ereignisablaufes, die mit unterschiedlichen Verzweigungswahrscheinlichkeiten versehen sind. Zur besseren Veranschaulichung dieses Ereignisablaufes werden sogenannte Ereignisbäume verwendet, die über Linien eine grafische Darstellung des Ablaufes wiedergeben

Bei der Modellierung der Ereignisbäume sind folgende Regeln zu beachten:

- Für jedes auslösende Ereignis wird für sich ein detailliertes Ablaufdiagramm erstellt.

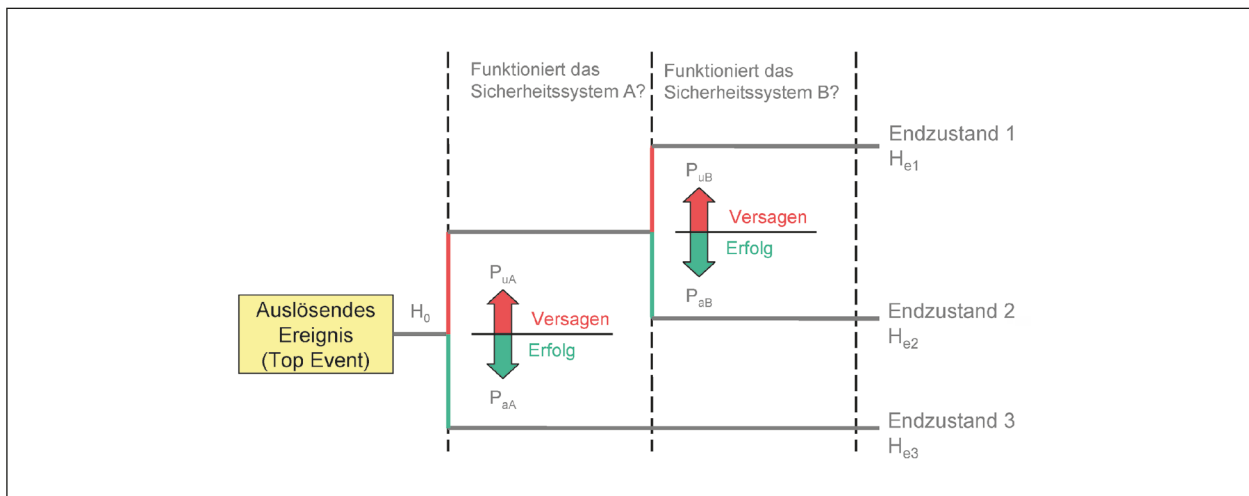


Bild 11: Beispiel für einen Ereignisbaum [11]

- Der Zweig des Ereignisablaufes wird bis zu dem Zeitpunkt verfolgt, an dem das System einen endgültigen Zustand (Endzustand) erreicht hat und eine weitere Verzweigung nicht mehr möglich ist.

Eine weitere Betrachtung für beherrschbare Ereignisabläufe (d. h. Erfolg eines Sicherheitssystems) kann notwendig sein, wenn sich die Randbedingungen durch Einflussfaktoren wie Zeit oder andere Systemausfälle ändern können.

- Die Systemantworten werden im Ablaufdiagramm in der zeitlichen Reihenfolge ihres Auftretens aufgeführt.
- Es werden nur Systemantworten dargestellt, die eine unmittelbare Wirkung auf die Ablaufentwicklung der Ereignisse haben. Alle mittelbar benutzten Subsysteme, wie zum Beispiel das der Energieversorgung, sind nicht Bestandteil der Ablaufentwicklung, sondern werden in den zugehörigen Verzweigungswahrscheinlichkeiten berücksichtigt.

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

$$H_{ei} = H_0 \prod P_{u,i}$$

Mit:

$H_{e,i}$ 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.

Innerhalb des Ereignisablaufs sind zur Abbildung von Brandereignissen folgende Verzweigungen vorgesehen:

- Ereignisort (z. B. Einfahrtsbereich/Tunnelinnenstrecke/Tunnelmitte...)
- Verkehrsaufkommen (Tag/Nacht/...)
- Verkehrszustand (freier Verkehr/Stau)
- Brandlast (5/30/100 MW)
- Brandentwicklung (schnell/verzögert)
- Detektion erfolgreich (ja/nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich (ja/nein)
- Tunnelsperreinrichtung aktiviert (ja/nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja/nein)
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja/nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja/nein)
- Beginn der Fremdrettungsmaßnahmen

Dieser Ereignisablauf gilt generell sowohl für die bisherigen Risikoanalysen gemäß Heft B66 sowie den Adaptierungsvorschlag. Dennoch ergeben sich punktuelle Unterschiede, die in den nachfolgenden Kurzbeschreibungen erläutert werden.

Ereignisort

Durch die Lage des Ereignisortes können sich aufgrund geometrischer und verkehrlicher Randbedingungen sowie infolge betriebstechnischer Einrichtungen unterschiedliche Schadensausmaße ergeben. Ggf. ist es notwendig, mehrere Brandorte abzubilden. Dies gilt beispielsweise bei Untertunneln mit unterschiedlichen Gradientenverläufen (Gefälle, Tiefpunkt, Steigung). Bei konstanten Längsneigungen ist häufig ein Brandort in Tunnelmitte im Bereich eines Notausganges, der dann nicht mehr zur Flucht zur Verfügung steht, zielführend.

Brandlast

In Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie ergeben sich unterschiedliche Brandszenarien. In aller Regel werden Brände mit einer Brandleistung von 5, 30 bzw. 100 MW zugrunde gelegt. Ein Lkw-Brand mit einer Brandleistung von 100 MW führt im Allgemeinen zu größeren Schadensausmaßen, tritt aber im Vergleich zu einem Lkw-Brand mit 30 MW deutlich seltener auf.

Im Adaptierungsvorschlag wird eine Verteilung in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil vorgesehen. 6 % des SV-Anteils ist demnach 100 MW-Bränden zuzuordnen, 94 % des SV-Anteils 30 MW-Bränden. Der Pkw-Anteil ist 5 MW-Bränden zuzuordnen.

Brandentwicklung

Im Adaptierungsvorschlag werden unterschiedliche Brandverläufe berücksichtigt. Brände infolge von Unfällen sind durch einen schnellen Brandverlauf gekennzeichnet. Den Bränden aufgrund von technischen Defekten geht eine Phase von 5 min voraus, in denen zunächst die Brandleistung einem Niveau von 5 MW verharrt, bevor sie auf ihre maximalen Werte ansteigt.

In Heft B66 wurde nur eine Brandentwicklung berücksichtigt, die hinsichtlich der genauen Charakteristik nicht spezifiziert wurde. Der Adaptierungsvorschlag sieht dazu detaillierte Angaben vor. Hinsichtlich der Anteile wird vorgeschlagen, aus Unfällen resultierende Brände zu 100 % einem schnellen Brandverlauf zuzuordnen, aus technischen Defekten resultierende Brände nur zu 10 %, die verbleibenden 90 % entsprechen damit einem verzögerten Brandverlauf.

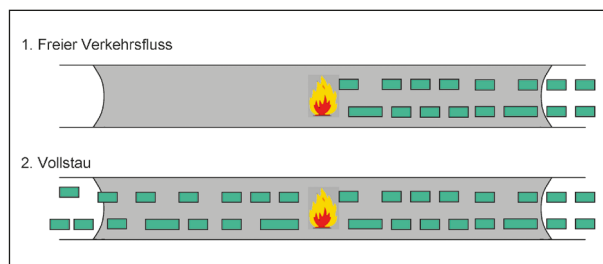


Bild 12: Maßgebliche Verkehrszustände im Richtungsverkehrsbetrieb

Verkehrszustand

Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Schadensereignisses. Prinzipiell ist hierbei zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und bei Vollstau zu unterscheiden. Im Fall eines Schadensereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge sich vor dem Brandherd aufstauen, während die sich auf der stromabwärtigen Seite befindenden Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können.

Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Vollstaus, z. B. infolge von Unfallereignissen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. In Bild 12 sind die maßgeblichen Verkehrszustände schematisch für einen Richtungsverkehrstunnel dargestellt.

Der individuelle Stauanteil von Bestandstunneln kann stark variieren. Für neu geplante Tunnel im Richtungsverkehr mit in der Regel frei abfließendem Verkehr hinter dem Brandort bzw. Verkehrsqualität D oder besser nach HBS wird im Adaptierungsvorschlag ein Stauanteil von 50 h/Jahr und Röhre berücksichtigt, der sich aus den EABT-80/100 ableitet.

Verkehrsaufkommen

In Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens variiert die Anzahl an potenziell betroffenen Personen während eines Brandereignisses. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichem Verkehrsaufkommen wird zwischen Situationen bei Tag (hohe Verkehrsbelastung) und Nacht (geringere Verkehrsbelastung) unterschieden. Ggf. ist auch die Spitzenstunde abzubilden.

Verkehrserhebungen zeigen, dass der Tagverkehr (06.00 – 22.00 Uhr) einen deutlich höheren Anteil

am Verkehrsaufkommen als der Nachtverkehr (22.00 – 6.00 Uhr) aufweist. Sofern keine detaillierten Werte vorliegen, können Grundwerte, z. B. aus den RLS-19 (Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen) [31] abgeleitet werden. Demnach tritt in den Tagstunden ca. 89 % des Gesamtverkehrsaufkommens auf.

Detektion und Alarmierung

Das Erkennen und Melden eines Ereignisses (Detektion) mit einer anschließenden Alarmierung der Tunnelnutzer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Selbstrettungsmöglichkeiten und damit auch auf das zu erwartende Schadensausmaß. Daher ist eine Unterscheidung nach einer erfolgreichen Detektion bzw. keiner Detektion relevant. Im Anpassungsvorschlag werden Sensoren zur Branderkennung direkt modelliert und ermöglichen damit abhängig von der Brandentwicklung und der Strömungsverhältnisse eine individuellere Detektionszeit, die aber die maximalen Detektionszeiten gemäß den EABT-80/100 nicht überschreiten darf. Zur Berücksichtigung eines Systemausfalls wird die Annahme getroffen, dass die automatische Detektion nur in 95 % der Fälle erfolgt.

Die Schadensausmaßberechnungen gemäß Heft B66 erfolgen meist, sofern nicht spezielle Fragestellungen relevant werden, über einen makroskopischen Modellansatz, bei dem sich mit der Alarmierung Personen mit einer mittleren Gehgeschwindigkeit zur Flucht begeben.

Im Rahmen des Anpassungsvorschlages soll hier eine stärkere Individualisierung erfolgen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass zwischen Detektion und tatsächlichem Beginn der Flucht eine Zeitspanne von 90 sec vergeht, die sich aus den Angaben in [29] und [30] ableitet. Demnach gelten für Personen, die wach sind und über ein automatisches Alarmierungssystem informiert werden, aber mit der Umgebung nicht vertraut sind, Reaktionszeiten zwischen 30 s und 2,5 min. Findet keine direkte Alarmierung über automatische Systeme statt, so wird eine verzögerte Fluchtreaktion von 3 min angenommen, die z. B. durch Wahrnehmung von Brand oder Rauch (Gefährdungserkennung) oder entgegenkommende Personen (Lemming-Effekt) ausgelöst wird. Zusätzlich stehen auch manuelle Brandmeldeeinrichtungen (Notruf, Betätigung Handfeuermelder) zur Verfügung, über die Tunnelnutzer einen Brand (verzögert) melden können. Versuche zei-

gen, dass sich nicht alle Menschen tatsächlich zur Flucht begeben (können). Deren Anteil wird mit ca. 10 % aller Tunnelnutzer abgeschätzt. Das Versagen von automatischer Detektion und Alarmierung wird im Anpassungsvorschlag mit 5 % angenommen.

Sperreinrichtung

Durch eine Sperreinrichtung kann verhindert werden, dass nach der Detektion eines Schadensereignisses noch weitere Fahrzeuge in den Tunnel einfahren und somit zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes führen. Da technische Systeme auch Fehler ausweisen können, wird angenommen, dass in 5 % der Fälle keine Sperrung erfolgt. Die einzuhaltenden Sperrzeiten sind in den EABT-80/100 mit 30 sec nach der Detektion angegeben.

Lüftung

Mithilfe von Lüftungssystemen kann im Fall von Bränden sowie in Fällen mit Kontamination das Schadensausmaß positiv beeinflusst werden. Die Lüftungsanlage stellt damit ein zentrales Element der Selbstrettung im Tunnel dar und ist im Ereignisablauf zu berücksichtigen. Auch hier werden die Ausfallanteile im Anpassungsvorschlag gegenüber dem Verfahren gemäß Heft B66 von 1 % auf 5 % erhöht.

Weitere Sicherheitssysteme

Sind in einem Tunnel zusätzliche relevante Sicherheitssysteme vorhanden, so sind auch diese in den Ereignisbaum einzubinden. Als Beispiel dafür seien Brandbekämpfungsanlagen genannt.

Erhöhte Schadensausmaße

Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, mit in das Ereignis involviert sind. Da der Eintritt dieses Ereignisses stets zu einer Vergrößerung des Schadensausmaßes führen kann, ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen.

Fremdrettung

Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des

Schadensausmaßes beitragen. Neben der Abbildung einer direkten Löschwirkung (z. B. eines Feuerwehreinsatzes oder einer Brandbekämpfungsanlage) kann damit auch die Rettung von Personen aus dem Gefahrenbereich im Tunnel abgebildet werden.

Es wird vorgeschlagen, das Element der Fremdrettung in der Adaptierung zu berücksichtigen. Im Adaptierungsvorschlag wird dazu simulativ die Löschwirkung abgebildet (Wassereinsatz im CFD-Modell). Diese direkte Beeinflussung des Brandverhaltens verbessert die Fluchtbedingungen. Die Auswirkung der Fremdrettung auf das Schadensausmaß wird auch über die Eintreffwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Eintreffzeit berücksichtigt. Hier wird angenommen, dass Einsatzkräfte z. B. bewusstlose Personen aus dem Gefahrenbereich retten. Insgesamt werden für den Tunnel 5 Zeitintervalle (in $\leq 5 / < 10 / < 15 / < 20 / \geq 20$ min) betrachtet. Die damit erreichbaren Ausmaßminderungen sind für jeden Tunnel individuell zu ermitteln und nachfolgend nur exemplarisch dargestellt.

Betriebsart

Darüber hinaus hat die Anzahl der Röhren sowie die Betriebsart des Tunnels Einfluss auf die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien. Neben einem Richtungsverkehrsbetrieb tritt z. B. für Wartungsmaßnahmen die Notwendigkeit auf, Tunnel temporär im Gegenverkehr zu betreiben. Auch für Sanierungsmaßnahmen ist ggf. ein längerfristiger Gegenverkehrsbetrieb erforderlich, bei dem sich Risikounterschiede aufgrund der Betriebsart ergeben.

7.4 Modellebene – Schadensausmaßermittlung Kollision

Die gefahrene Geschwindigkeit im Tunnel hat neben der Unfallrate (siehe Kapitel 7.3.2.8) auch Einfluss auf das resultierende Schadensausmaß im Fall einer Kollision. Aus der Ereignisdatenbank konnten keine aussagekräftigen Zusammenhänge abgeleitet werden. Daher soll der Einfluss mithilfe des Nilsson Power Modells begründet werden. Das Nilsson Power Modell beruht auf dem direkten Zusammenhang zwischen der Änderung der mittleren Geschwindigkeit und der daraus resultierenden Änderung im Unfallgeschehen, und zwar sowohl im Hinblick auf die Unfallhäufigkeit (in diesem Zusam-

menhang analog zur Unfallrate zu sehen) als auch im Hinblick auf die Unfallschwere. Der unterschiedliche Einfluss der Geschwindigkeit auf diese beiden Teilbereiche bzw. auch auf die Häufigkeiten von Unfällen mit unterschiedlichem Schweregrad, wird über den Zahlenwert des Exponenten abgebildet.

$$\frac{\text{Unfälle}_{nachher}}{\text{Unfälle}_{vorher}} = \left[\frac{\bar{v}_{nachher}}{\bar{v}_{vorher}} \right]^{\text{Exponent}}$$

Die Exponenten für den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Anzahl der betroffenen Personen bzw. der zu erwartenden Unfälle sind, zusammen mit den ermittelten Konfidenzintervallen, in Tabelle 20 zusammengefasst. Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer statistischen Auswertung einer großen Anzahl durchgeführter Verkehrssicherheitsstudien.

Die Erhöhung der Unfallrate mit zunehmender Geschwindigkeit lässt sich mit der Verkürzung der zur Verfügung stehenden Reaktionszeit erklären. Für die Erhöhung der Anzahl der betroffenen Personen, also des mechanischen Schadensausmaßes, ist hingegen die mechanische Einwirkung und damit die Anprallenergie – kinetische Energie, verantwortlich. Es wird daher empfohlen, auch aufgrund der guten Übereinstimmung mit den statistisch nachgewiesenen Abhängigkeiten in Tabelle 20, das Schadensausmaß für Kollisionen ohne Brand mit dem Exponenten 1 gemäß dem Faktor

$$f_{SA}^{mechanisch} = \left[\frac{v_{zul}}{80 \frac{km}{h}} \right]$$

zu modellieren.

Grundsätzlich ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Schadensausmaßes nur über einen bestimmten Bereich durch einen simplen exponentiellen Zusammenhang abgebildet werden kann. Für geringe bzw. sehr hohe Geschwin-

Unfälle/ Verletzungsschwere	Mittelwert	95%-Konfidenzintervall
Anzahl der Getöteten	4,3	(3,7, 4,9)
Unfälle mit Getöteten	3,5	(2,4, 4,6)
Anzahl verletzte Personen	2,0	(1,6, 2,4)
Unfälle mit Personenschaden	1,5	(1,2, 1,8)

Tab. 20: Statistisch nachgewiesene Exponenten des Power-Modells für ausgewählte Beobachtungsgrößen

digkeiten gibt es ein gewisses Sättigungsverhalten. Das heißt für hinreichend kleine Geschwindigkeiten ist eine Todesfolge sehr unwahrscheinlich. Erst bei Geschwindigkeiten, die zu hinreichend hohen Anprallenergien führen, werden eine Todesfolge bzw. schwere Verletzungen wahrscheinlich. Analog dazu gilt für sehr hohe Geschwindigkeiten, dass die Anprallenergien bereits ausreichen, um sehr wahrscheinlich zu schweren Verletzungen bis hin zu Todesopfern zu führen und eine weitere Erhöhung der Geschwindigkeit diese Wahrscheinlichkeit nicht mehr maßgeblich beeinflusst. Es liegt daher nahe, Ober- bzw. Untergrenzen für den Einsatz von o. g. Ansatz zu definieren. Es wird aus diesem Grund zusätzlich vorgeschlagen, den Geschwindigkeitsfaktor im Bereich einer Minimalgeschwindigkeit von 30 km/h und einer Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h anzuwenden und bei geringeren oder höheren Geschwindigkeiten den Geschwindigkeitsfaktor für 30 km/h bzw. 130 km/h zu verwenden.

7.5 Modellebene – Schadensausmaßermittlung Brand

7.5.1 Simulationsmodelle

Im Fall eines Brandereignisses innerhalb eines Straßentunnels können die Verkehrsteilnehmer (Nutzer) infolge von Einwirkungen durch Rauchpartikel, Wärme und toxisch wirkender Brandgase gefährdet werden. Hohe Konzentrationen an Rauchpartikeln führen zur Einschränkung der Sichtverhältnisse sowie zur Reizung der Atemwege sowie der Augen und behindern dadurch die Nutzer in ihrer Orientierung und Fortbewegung. Ein Verlegen der oberen Atemwege durch Rauchpartikel kann im Weiteren zum Ersticken führen. Von der Vielzahl der im Zuge eines Brandes freigesetzten Brandgase wirken insbesondere 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 infolge eines Brandes freigesetzte Energie kann durch Wärmestrahlung oder infolge konvektiver Wärmeübertragung schädigend auf den Menschen wirken. Während sich Effekte aus der Wärmestrahlung in der Regel auf den unmittelbaren Brandbereich beschränken, kann durch die konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der

Strömung über weite Bereiche transportiert werden. In trockener Luft ist nach Purser (1995) ab einer Temperatur von 120 °C mit Verbrennungen auf der Haut zu rechnen. Temperaturen unterhalb von 120 °C führen zur Wärmestaubildung und der Gefahr eines Kreislaufkollapses. In feuchter Luft treten entsprechende Schädigungen bereits deutlich früher ein. Die Energie- und Stofffreisetzung ist von der Brandlast abhängig und kann durch die Ventilationsverhältnisse am Brandort und durch Löschmaßnahmen beeinflusst sein. Die Ausbreitung von Rauch, Wärme und den Brandgasen variiert in Abhängigkeit der geometrischen Ausbildung eines Tunnels sowie der sich innerhalb eines Tunnels einstellenden Strömungsbedingungen infolge von Effekten des thermischen Auftriebs, den Fahrzeugbewegungen, dem Lüftungssystem und dessen Steuerung, dem Winddruck auf die Portale. Die Aktivierung eines Löschsystems beeinflusst ebenfalls die Verteilung dieser Einwirkgrößen.

Um diese Einwirkungen bei der Schadensausmaßermittlung berücksichtigen zu können, wird ein Simulationsmodell benötigt, das die zeit- und raumdiskrete Berechnung der Wärme- und Stoffausbreitung in Abhängigkeit von der Entwicklung des Brandes sowie strömungsmechanischer Randbedingungen ermöglicht. Das Simulationsmodell sollte auf einem Brandmodell basieren, das eine brennstoffspezifische Modellierung erlaubt. Außerdem muss möglich sein, jede Art von Lüftungszuständen, sei es auf Basis von atmosphärischen Prozessen oder mechanischen Lüftungsanlagen sowie Löschmaßnahmen, zu modellieren. Als Ergebnis der Berechnungen müssen mindestens Aussagen über Druck, Geschwindigkeit, Temperatur und Konzentration im Rechengebiet vorliegen. Hierfür geeignete Rechenprogramme (CFD-Modelle) sind z. B.

- Fire Dynamics Simulator (FDS)
- OpenFOAM

7.5.2 Wirkungsmodelle zur Abschätzung von Brandfolgen

Grundlage für die Modelle zur Ermittlung der Auswirkungen auf Nutzer und Bauwerk infolge eines Brandes bilden die mittels CFD-Berechnungen raum- und zeitdiskret bestimmten Einwirkungen aus Druck, Wärme, Konzentrationen und Extinktion/Sichtweite.

7.5.2.1 Wirkung von Rauch

Durch den Einfluss von Rauch kann die Orientierung und Fortbewegung stark behindert bzw. unmöglich werden. Einen Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit wurde in MAYER 2006 [12] auf Basis von Untersuchungen durch Jin 1985 abgeleitet. Dieser Zusammenhang ist in Bild 13 für den Einfluss einer starken und einer schwachen Irritation (Reizung) dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass ab einer Sichtweite unterhalb von 10 m mit einem drastischen Rückgang der Fluchtgeschwindigkeit zu rechnen ist.

Abhängig von der Rauchzusammensetzung ist bei einer starken Irritation der Augen, wie sie bei real ablaufenden Fahrzeugbränden i. d. R. anzutreffen ist, bei ca. 5 m Sichtweite keine Fortbewegung mehr möglich. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine Orientierungslosigkeit schon deutlich früher einsetzt. Ein gezieltes Aufsuchen von Notausgängen ist nur möglich, wenn diese auch erkannt werden, bzw. entsprechende Einrichtungen den Flüchtenden dorthin führen. Für den Flüchtenden im Tunnel bedeutet dies, dass er mindestens die Fluchtwegkennzeichen wahrnehmen können muss. Bei einem Abstand von 25 m müssen diese daher im Extremfall auf mindestens diese Entfernung vom Flüchtenden erkannt werden.

7.5.2.2 Wirkung toxischer Brandgase

Im Fall eines Brandes werden i. d. R. eine Reihe von toxisch wirkenden Schadstoffen an die Umgebung abgegeben. Von der Vielzahl der im Brandrauch enthaltenen toxischen Rauchgaskomponenten wirken insbesondere Kohlenmonoxid (CO) und Blausäure (HCN) akut toxisch auf den Menschen. Beide Gase wirken bereits in geringen Konzentrationen narkotisch und führen bei längerer Expositionszeit oder bei höheren Konzentrationen sehr rasch zum Tod.

Kohlenmonoxid entsteht bei praktisch jedem Verbrennungsvorgang infolge unvollständiger Verbrennungsprozesse. Es gehört zu der Gruppe der farb- und geruchslosen Gase. Es ist darüber hinaus schwer wasserlöslich und dringt daher bis in tiefe Lungenregionen vor. Seine schädigende Wirkung liegt in der gegenüber dem Sauerstoff ca. 250-fach höheren Affinität zum Blutfarbstoff Hämoglobin. Das dabei entstehende Carboxyhämoglobin (CO-Hb) reduziert den Sauerstofftransport im Blut. Bereits ab einem Anteil von ca. 20 % CO-Hb im Blut treten erste toxische Wirkungen auf und führen ab einem Anteil von ca. 40 % zur Bewusstlosigkeit. CO-Hb-Konzentrationen zwischen 50 % und 70 % führen schließlich zum Tod.

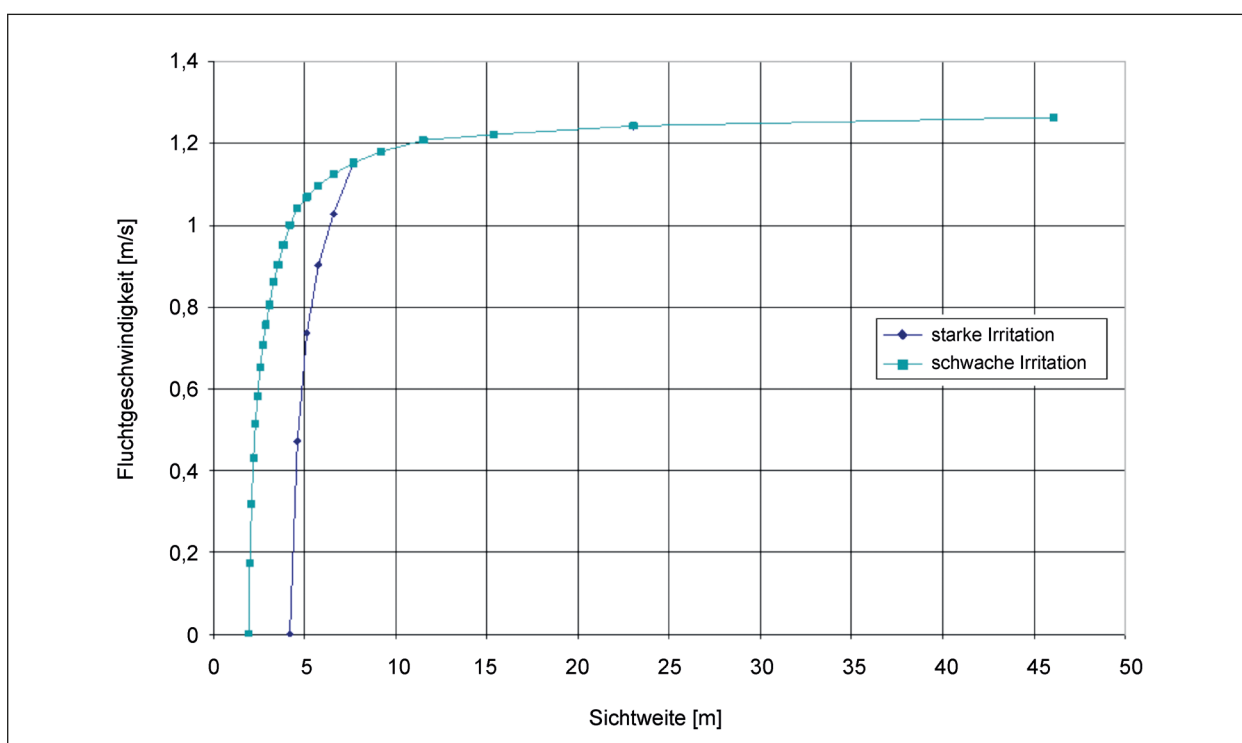


Bild 13: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte

Blausäure weist gegenüber Kohlenmonoxid eine ca. zehnmal höhere Toxizität auf. Es entsteht bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Materialien. Hierzu zählen beispielsweise Acryl, Nylon, Polyurethan und Wolle. Das Blausäuregas ist im Gegensatz zum Kohlenmonoxid leicht wasserlöslich und kann daher durch den menschlichen Organismus sowohl oral als auch durch Inhalation aufgenommen werden. Untersuchungen zeigen, dass bereits Konzentrationen von 180 bis 270 ppm in der Atemluft bei kurzzeitiger Exposition und Konzentrationen von 90 ppm bei längerer Exposition zum Tode führen.

Beide Brandgase können unabhängig voneinander ihre toxische Wirkung entfalten, d. h. ihre Wirkungen können sich addieren.

Die Wirkung eines Gases auf den menschlichen Organismus lässt sich nach HABER (1924) über das Produkt aus Konzentration und Einwirkzeit beschreiben, welches für den jeweiligen Effekt einen konstanten Wert annimmt:

$$W = C \cdot t$$

Mit:

W const. Dosis [ppm*min]

C Konzentration [ppm]

t Expositionsdauer [min]

Bei bekannter Dosis lassen sich somit die Konzentrationen in Abhängigkeit von der Zeit ermitteln.

Um die Effekte durch ein gleichzeitiges Einwirken mehrerer toxischer Substanzen auf den Menschen berücksichtigen zu können, wurde von Purser die Fractional Effective Dose (FED) Methode entwickelt. Hierbei wird die in einem Zeitintervall Δt aufgenommene Teildosis $C \cdot t$ der zur Handlungsunfähigkeit bzw. zum Tod führenden Gesamtdosis wie folgt ins Verhältnis gesetzt:

$$FED = \frac{\text{im Zeitintervall } \Delta t \text{ aufgenommene Teildosis } Ct}{\text{Gesamtdosis die zu Handlungsunfähigkeit oder zum Tod führt}}$$

Handlungsunfähigkeit liegt vor, sobald das Verhältnis aus der Summe der Teildosen über die Zeitintervalle zur Gesamtdosis den Wert eins erreicht hat. Bei der Einwirkung von mehreren Schadstoffen tritt eine Handlungsunfähigkeit ein, wenn die Summe aus den einzelnen FED den Wert eins ergibt.

Eine Zusammenstellung der Fractional Lethal Dose – Werte, ab denen mit einer Handlungsunfähigkeit zu rechnen ist, enthält Tabelle 21.

Um das Zusammenwirken unterschiedlicher Reizstoffe zu berücksichtigen, wurde von Purser das Modell der Fractional Irritant Concentration (FIC) entwickelt. Hierbei wird die aktuelle Konzentration eines Reizstoffes zu einem kritischen Referenzwert wie folgt ins Verhältnis gesetzt:

$$FIC = \frac{\text{Konzentration eines Reizstoffs, dem eine Person zum Zeitpunkt (t) ausgesetzt ist}}{\text{erf. Konzentration eines Reizstoffs, um die Fluchteffizienz zu beeinträchtigen}}$$

Ähnlich dem FED-Modell werden dabei die Quotienten aus der aktuellen Konzentration und einem kritischem Referenzwert für den betreffenden Reizstoff gebildet. Analog zum FED Modell liegt ab einem Wert ≥ 1 eine Reizwirkung vor, die zu einer Einschränkung der Fluchtmöglichkeiten bzw. zu einer Handlungsunfähigkeit führt. Im Unterschied zu der FED-Methode spielt bei diesem Ansatz die Expositionsdauer keine Rolle. Hier wird für jeden Zeitpunkt der momentane Konzentrationswert verwendet.

Eine Zusammenstellung der Fractional Irritant Concentration – Werte, ab denen mit einer Handlungsunfähigkeit zu rechnen ist, enthält Tabelle 22.

	HCl	HBr	HF	SO ₂	NO ₂	C ₃ H ₄ O	CH ₂ O
F _{FLD} (ppm x min)	114.000	114.000	87.000	12.000	1.900	4.500	22.500

Tab. 21: Fractional Lethal Dose – Werte

	HCl	HBr	HF	SO ₂	NO ₂	C ₃ H ₄ O	CH ₂ O
F _{FIC} (ppm)	900	900	900	120	350	20	30

Tab. 22: Fractional Irritant Concentration – Werte

7.5.2.3 Wirkung von Wärme

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, während durch konvektive Wärmeübertragung Wärme mit der Strömung über weite Bereiche transportiert werden kann. Die damit verbundene Erhöhung der Umgebungstemperatur kann in Abhängigkeit von der Expositionsdauer zu Wärmestaubildung im menschlichen Organismus und zu Verbrennungen führen. Im Allgemeinen führen kurze Expositionszeiten aufgrund der körpereigenen Wärmekapazität zu keiner signifikanten Erhöhung der Körpertemperatur. Jedoch können bereits kurze Expositionszeiten zu Verbrennungen auf der Haut und im Atemtrakt führen.

Als Zeit für das Erreichen einer Handlungsunfähigkeit infolge einer konvektiven Wärmeübertragung bei einer mittleren Luftfeuchte gibt Purser folgenden Zusammenhang an:

$$\tau_{conv} = \frac{5 \cdot 10^7}{T^{3,4}}$$

Mit:

τ Zeit in Minuten

T Temperatur in °C

Für das Erreichen der Schmerzgrenze infolge Wärmestrahlung wird von Purser folgender Zusammenhang angegeben

$$\tau_{rad} = \frac{1,33}{q^{1,33}}$$

Mit:

τ Zeit in Minuten

q Wärmestrahlung in kW/m²

Die Fractional Effective Dose (FED) für eine thermische Belastung kann wie folgt berechnet werden:

$$FED_{thermisch} = \sum \left(\frac{\Delta t}{\tau_{conv}} + \frac{\Delta t}{\tau_{rad}} \right)$$

Ab einem Wert ≥ 1 besteht dann eine Handlungsunfähigkeit.

7.5.3 Zeitschiene

Ein wesentlicher Teil im Zuge der Überarbeitung des Schadenausmaßmodells betrifft die Diskussion und ggf. Festlegung einer detaillierten Zeitschiene, die dem Modell zugrunde liegt. Hierbei sollen Möglichkeiten geschaffen werden, Maßnahmen zu bewerten, die wesentlichen Einfluss auf die einzelnen Zeitschritte aufweisen. Parallel dazu soll ebenfalls die Zeitschiene relevant für den Referenztunnel festgelegt werden.

7.5.3.1 Brandkurven

Ein Brand ist ein exotherm ablaufender chemischer Umsetzungsprozess mit der Freisetzung von Energie in Form von Wärme und Licht (Flammen) infolge der Oxidation eines Materials mit Sauerstoff. Voraussetzung hierfür ist, dass oxidationsfähige Stoffe (Brandlast) sowie Oxidationsmittel (Sauerstoff) in ausreichender Menge vorhanden sind. Von der Zündung bis zum Erlöschen durchlaufen Brände mehrere charakteristische Phasen. Hierbei lassen sich grundsätzlich folgende 5 Phasen unterscheiden:

- Phase 0: Zündung
- Phase 1: Brandentwicklung (Schwelen, Glimmen)
- Phase 2: Flashover (Feuersprung)
- Phase 3: Vollbrand
- Phase 4: Abklingender Brand

Phase 0: Zündung

Um eine Reaktion zwischen Brandlast und Oxidationsmittel auslösen zu können, ist eine Zündquelle erforderlich, über welche die hierzu notwendige Aktivierungsenergie den Reaktionspartnern zugeführt werden kann. Nur wenn Brandlast (Brennstoff), Oxidationsmittel (Sauerstoff) und Zündquelle (Zündenergie) am gleichen Ort und zur gleichen Zeit zusammentreffen, sind die Voraussetzungen für eine Brandentstehung gegeben. Damit es dann zu einer Entzündung kommen kann, müssen Brennstoff und Oxidationsmittel innerhalb der Zündgrenzen miteinander vermischt sein sowie die Energie der Zündquelle direkt darauf einwirken. Die Auslösung einer Zündung kann entweder durch das direkte Einwirken von Flammen und Funken oder spontan infolge

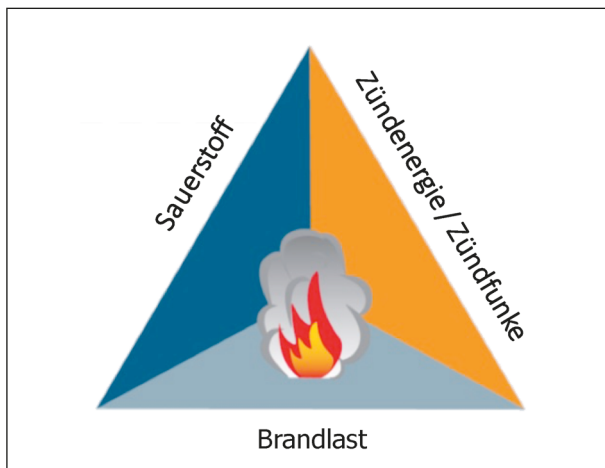


Bild 14: Abhängigkeit von Brandlast, Zündung, Sauerstoff (Branddreieck) (Quelle: Siemens, 2016)

einer Akkumulation von Wärme im Brennstoff erfolgen. In Bild 14 sind diese grundsätzlichen Abhängigkeiten mithilfe des sogenannten Branddreiecks zusammenfassend dargestellt.

In Tunneln stellen insbesondere die Fahrzeuge einschließlich ihrer Ladungen bedeutende Brandlasten dar. Quellen für die Zündenergie bilden beispielsweise:

- direkte Flammeneinwirkung (Fahrzeugbrände, Motorraum)
- heiße Oberflächen (Motorraum, Auspuff, Turbolader, Bremsen etc.),
- elektrischer Kurzschluss (Fahrzeug, Infrastruktur),
- Funkenflug infolge Unfall (Fahrzeug)
- etc.

Phase 1: Brandentwicklung (Schwelen, Glimmen)

Nach der Zündung kann sich ein Brand langsam oder schnell entwickeln. Dies ist abhängig von der Art der Verbrennung, der Art der Brandlast (Brennstoff), der Wechselwirkungen mit der Umgebung und dem Zugang zu Sauerstoff.

Ein schwelender Brand kann gefährliche Mengen an giftigen Gasen erzeugen, während die Energiefreisetzungsraten relativ niedrig sind. Die Wachstumsphase eines solchen Brandes kann sehr lang und bereits wieder abklingend sein, bevor nachfolgende Phasen erreicht werden.

Ein schnelles Brandwachstum ist insbesondere bei einer flammenden Verbrennung zu verzeichnen, bei der zum einen die Brandlast (Brennstoff) so leicht brennbar ist, dass eine schnelle Flammenausbreitung über deren Oberfläche erfolgen kann und bei der zum anderen der Wärmefluss aus dem ersten brennenden Brennstoffpaket ausreicht, um benachbarte Brennstoffpakete zu entzünden.

Da in dieser Phase ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht, handelt es sich hierbei um brennstoffgesteuerte Brände.

Phase 2: Flashover (Feuersprung)

Als Feuersprung (Flashover) wird der Übergang von der Phase der Brandentwicklung zu einem Vollbrand bezeichnet. Er tritt ein, wenn sich die in der Phase der Brandentwicklung generierten brennbaren Gase und Aerosole entzünden und den Brand dadurch in die Bereiche trägt, in welche die Rauchgase aus der Phase der Brandentwicklung bereits vorgedrungen sind. Dieser Vorgang vollzieht sich dann nahezu explosionsartig. Charakteristisch für einen Feuersprung sind folgende Merkmale:

- Anstieg der Brandraumtemperatur auf 500 – 600 °C,
- Wärmestromdichte aus Flammen und Rauch von 15 bis 20 kW/m²
- Aus Brandraumöffnungen herausschlagende Flammen.

Die Dauer bis zum Eintritt eines Feuersprungs wird insbesondere durch folgende Faktoren beeinflusst.

- Raumgeometrie (insbesondere Deckenhöhe),
- Ventilationsbedingungen im Brandraum,
- Brandlast (Eigenschaften, Anordnung im Raum)
- Lage des Brandherdes.

Phase 3: Vollbrand

In dieser Phase erreicht die Energiefreisetzung ihr Maximum und es stellt sich ein Abbrand ein. Die Energiefreisetzung wird hierbei sehr häufig durch die Verfügbarkeit von Sauerstoff begrenzt (ventilationsgesteuerter Brand), da der für die Verbrennung benötigte Sauerstoff nur über die Brandraumöffnungen zuströmt. Bei ventilationsgesteuerten Bränden können sich unverbrannte Gase an der Decke an-

sammeln, die beim Austritt über die Brandraumöffnungen in Kontakt mit Sauerstoff geraten und zu verbrennen beginnen. Dadurch bilden sich Flammen, die aus den Öffnungen herausschlagen. Die durchschnittliche Gastemperatur innerhalb eines Brandraumes ist während dieser Phase häufig sehr hoch und liegt im Bereich zwischen 700 bis 1.200 °C.

Phase 4: Abklingender Brand

Mit zunehmendem Verbrauch des Brennstoffs nimmt die Energiefreisetzungsrates wieder ab und die durchschnittliche Gastemperatur innerhalb des Brandraums sinkt. Der Brand kann in diesem Zeitraum von einem ventilationsgesteuerten zu einem brennstoffgesteuerten Zustand übergehen.

Zusammenfassung Brandphasen

In Bild 15 ist schematisch der Verlauf eines Brandes in den einzelnen Phasen mit Temperaturwerten über die Zeit dargestellt. Zusätzlich sind darin die Temperaturzeitkurven nach ZTV-ING (RABT-Kurve), Eisenbahnbundesamt (EBA-Kurve), DIN 4102 (ETK-/ISO-Kurve) sowie der RWS (Niederlande) abgebildet. Daraus wird ersichtlich, dass die Phase der Brandentwicklung bei diesen normativen Temperaturzeitkurven vernachlässigt wird. Ihr Ursprung liegt im Beginn der Phase 2, dem Feuersprung. Die Phase der Brandentwicklung kann jedoch bei leicht

brennbaren Stoffen, wie z. B. brennbaren Flüssigkeiten, von sehr kurzer Dauer sein.

Zu den in Bild 15 dargestellten Bemessungsbrandkurven existieren nur wenige Anhaltswerte dazu, welche Energiefreisetzungsrates (HRR) erforderlich sind, um die angegebenen Temperaturverläufe zu generieren. Im Zuge des FE 15.0550/2011/ERB [25] wurden hierfür Simulationsrechnungen mithilfe des CFD-Programms FDS in einem rechteckförmigen Regelquerschnitt RQ 10,5 T mit einer lichten Weite von 9,5 m und einer lichten Höhe von 5,0 m durchgeführt. Der Anstieg der Energiefreisetzungsrates wurde dabei entsprechend der Temperaturzunahme der ZTV-Ing Kurve modelliert. Danach entsprechen 1.200 °C einer Brandleistung bzw. Energiefreisetzungsrates (HRR) von ca. 250 MW. Eine Brandleistung von 100 MW wird nach ca. 2 Minuten erreicht und bewirkt eine Temperatur von ca. 1.050 °C. Der Anstieg in der Brandleistung beträgt hierbei ca. 0,83 MW/s. Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind in Bild 16 dargestellt. Die niederländische RWS-Kurve soll einer Brandleistung von ca. 300 MW entsprechen.

Zur Abbildung eines Brandverlaufs infolge von Lkw-Bränden (HGV-Brände) wurde von der PIARC die idealisierte HRR-Kurve erstellt. Die maximale Brandleistung/Energiefreisetzungsrates (HRR) beträgt danach 140 MW. Eine Brandleistung von 100 MW wird innerhalb von 2 Minuten erzielt, was einer Zunahme in der Energiefreisetzungsrates

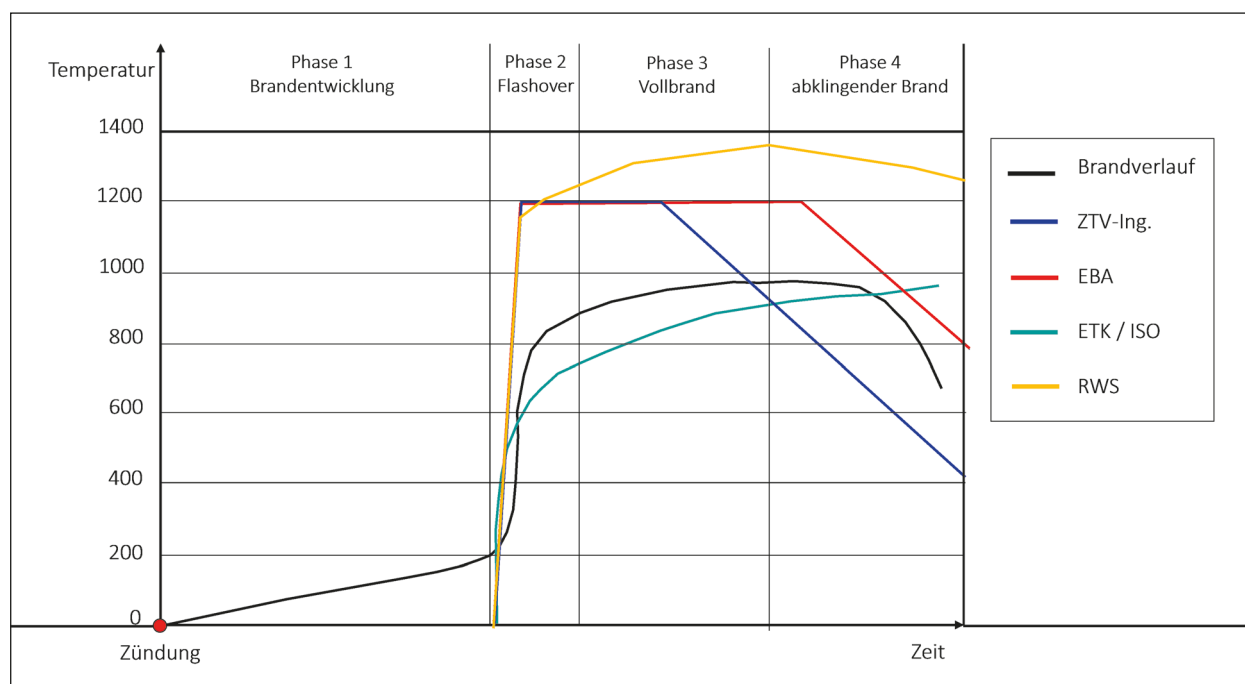


Bild 15: Brandverlauf in den einzelnen Brandphasen und Bemessungsbrandkurven (MAYER, 2020)

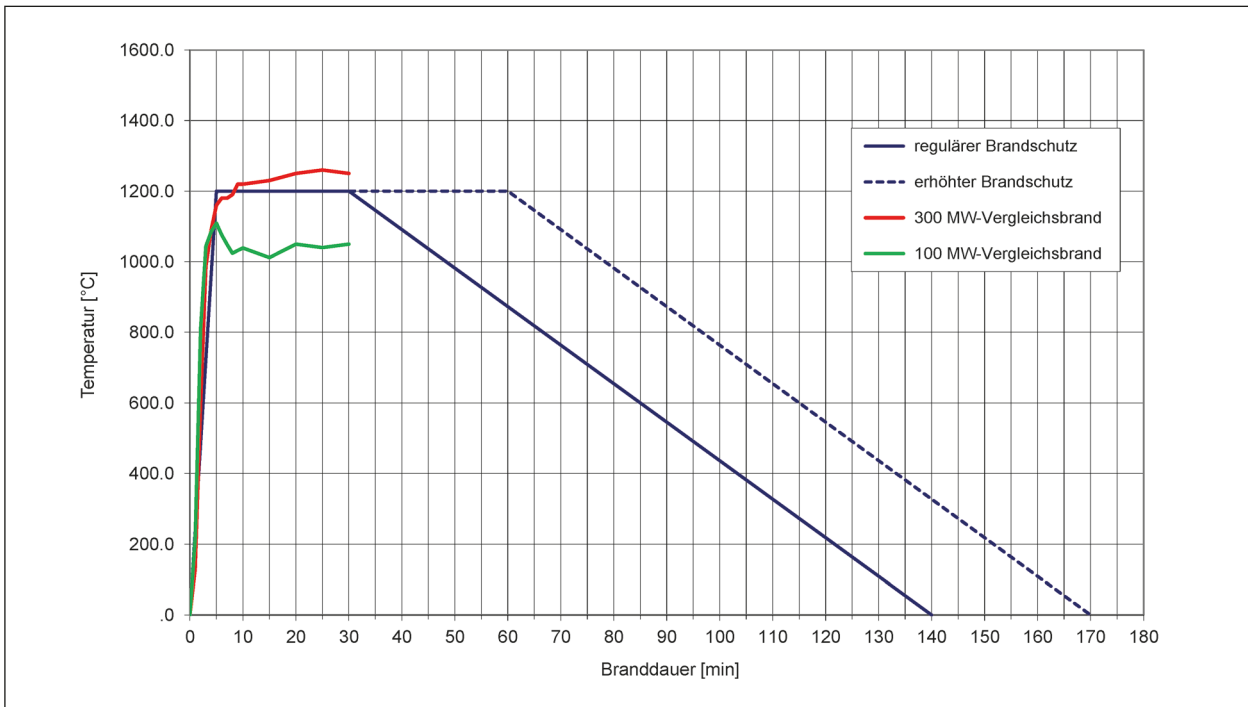


Bild 16: Vergleich Temperaturentwicklung ZTV-ING/Simulation (Quelle: MAYER, BRENNBERGER, GROßMANN, 2013)

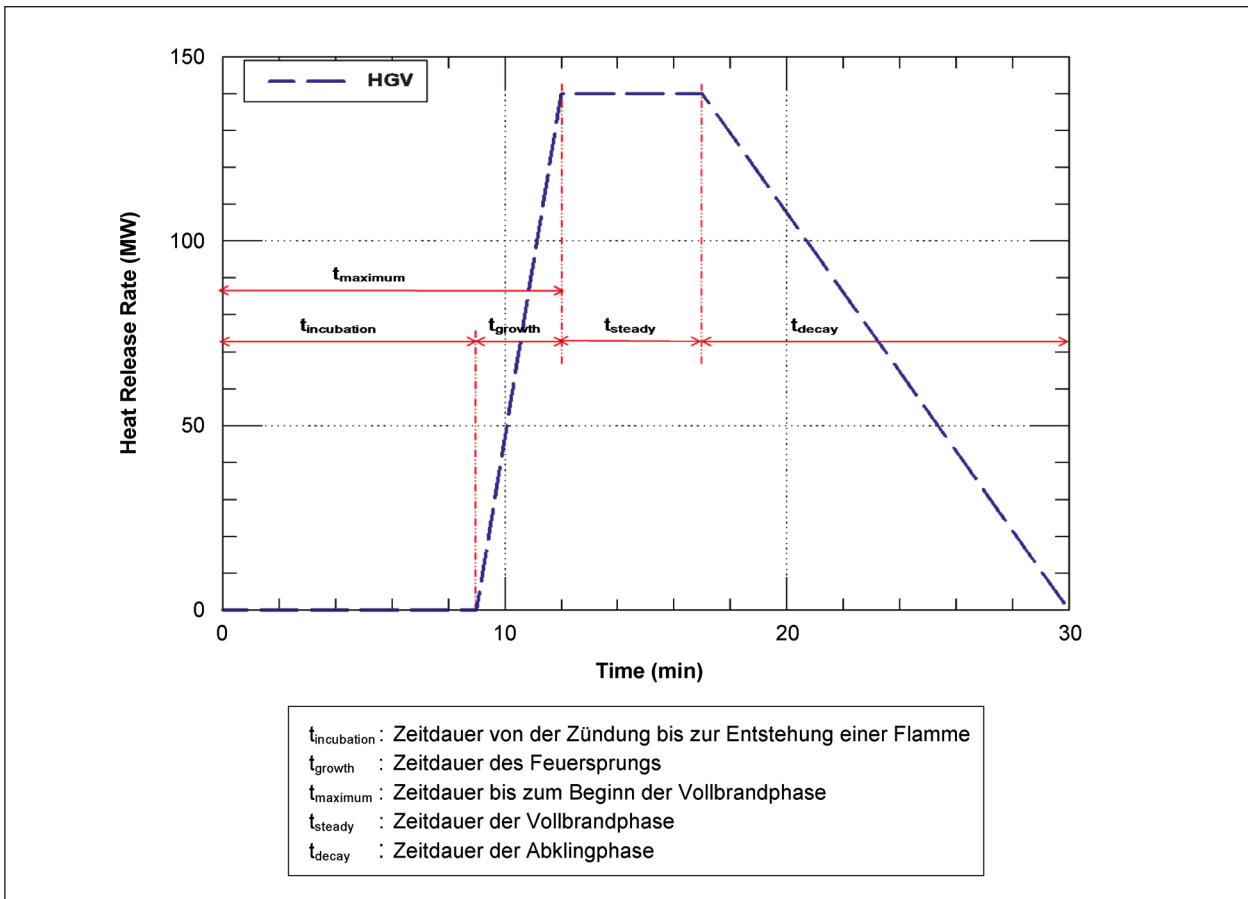


Bild 17: Idealisierte HRR-Kurve der PIARC (Quelle: PIARC 2011)

Versuchsreihe	Brandlast	$t_{\text{incubation}}$ [min]	t_{growth} [min]	t_{steady} [min]	t_{decay} [min]	Peak HRR [MW]
Eureka (1995)	Pkw	5	7	64	15	3
	Holzpaletten	4	10	44	20	18
	Heptane	0	15	92	17	9
	Vans/Bus	3	6	76	41	15
Rijkswaterstaat (2002)	Vans	5	4	23	9	18
Eureka (1995)	HGV	8	5	57	19	120
Runehamar (2003/2009)	T1 – 380 Holzpaletten – 74 PE-Paletten	5	13	40	10	202
	T2 – 216 Holzpaletten – 240 PUR Schaumstoffmatratzen	3	11	30	15	157
	T3 – Vermischte Güter (Möbel, Spielzeug, 10 Reifen)	2	8	30	18	117
	T4 – 600 Pappkartons – 18.000 PE-Becher – 40 Holzpaletten	3	4	25	10	67

Tab. 23: Zeitdauern und max. HRR (Quelle: PIARC 2011)

(HRR) von ca. 0,83 MW/s entspricht. Zur Beschreibung des Brandverlaufs wird unterschieden zwischen den Zeitdauern

- von der Zündung bis zur Entstehung einer Flamme ($t_{\text{incubation}}$),
- von der Zündung bis zum Beginn der Vollbrandphase (t_{maximum}),
- des Feuerübersprungs (t_{growth}),
- der Vollbrandphase (t_{steady}),
- der Abklingphase (t_{decay}).

In der Phase der Brandentwicklung von der Zündung bis zur Entstehung einer Flamme wird keine Energiefreisetzungsrate (HRR) angenommen. Den Verlauf der idealisierten PIARC HRR-Kurve zeigt Bild 17.

Eine Zusammenstellung zu den einzelnen Zeitdauern enthält Tabelle 23 in Abhängigkeit unterschiedlicher Brandlasten. Daraus geht hervor, dass brennbare Flüssigkeiten nach ihrer Zündung sofort in die Phase 2 des Feuersprungs übergehen. Demgegenüber weisen brennbare Feststoffe eine Brandentwicklungsdauer von 2 bis 5 Minuten auf. Außerdem zeigt sich, dass mit brennbaren Gütern (Feststoffen) beladene Lkw Brandleistungen von deutlich über 100 MW entwickeln können. Ein mit Paletten

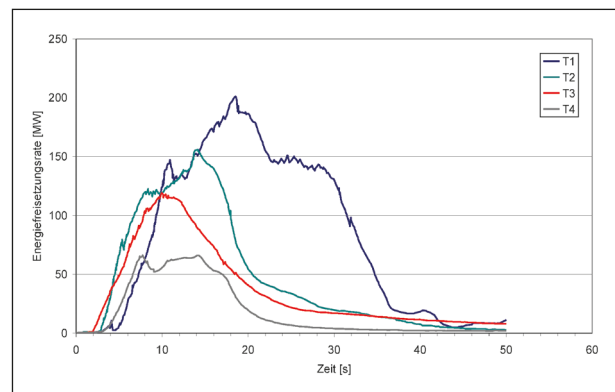


Bild 18: Brandverläufe aus Runehamer Brandversuchen (Quelle: INGASON, H. und LÖNNERMARK, A., 2005)

beladener Lkw erzielt eine Brandleistung von ca. 200 MW.

Bild 18 zeigt Energiefreisetzungsraten für brennbare Lkw-Ladungen (Feststoffe), wie diese im Zuge der Runehamer Brandversuche ermittelt wurden. Hierbei zeigt sich, dass Feststoffbrände in der Phase des Feuersprungs eine ähnliche Zunahme in der Energiefreisetzungsraten aufweisen. In den Versuchen T1 und T2 wird eine Brandleistung von 100 MW nach ca. 4 bis 4,5 Minuten erzielt. Dies entspricht einer Zunahme der Energiefreisetzungsraten (HRR) von 0,41 bzw. 0,37 MW/s für die untersuchten Brandlasten aus Holzpaletten in Kombination mit PE-Paletten bzw. Schaumstoffmatratzen.

In den niederländischen VRC Richtlijnen 2009 wird zwischen schnell und langsam ablaufenden Bränden differenziert.

Im Fall von Bränden infolge Unfall wird davon ausgegangen, dass 100 % der maximalen Brandleistung innerhalb von 120 s erreicht wird. Für einen 100 MW-Brand entspricht dies dann wiederum einer Zunahme in der Energiefreisetzungsrate von 0,83 MW/s. Für die Dauer eines Vollbrandes werden für Pkw und Busse 8 Minuten und für Lkw mehr als 30 Minuten angenommen.

Für Brände infolge technischen Defekts wird davon ausgegangen, dass die Phase der Brandentwicklung von der Zündung bis zum Beginn des Feuersturzes (Flashover) mit einer konstanten Energiefreisetzungsrate von 5 % der maximalen Brandleistung über 5 Minuten andauert. Der Anstieg auf die maximale Brandleistung erfolgt daran anschließend in weiteren 5 Minuten. Als Dauer für die Vollbrandphase wird für Pkw und Busse ein Zeitintervall von 5 Minuten und für Lkw eine Zeit von mehr als 30 Minuten angenommen.

In Bild 19 und Bild 20 sind die Brandverläufe entsprechend der VRC Richtlijnen 2009 dargestellt.

Auf Grundlage von mehreren Brandversuchen sowie Erkenntnissen aus realen Bränden hat die PIARC maximale Brandleistungen/Energiefreisetzungsraten für unterschiedliche Fahrzeugtypen ab-

geleitet. Die Brandleistungen betragen für Pkw zwischen 5 und 10 MW und für Transporter 15 MW. Busse erzielen eine Brandleistung von ca. 20 MW. Je nach zulässigem Gesamtgewicht sowie der Art und Menge der Ladung ergeben sich unterschiedliche Brandleistungen für Lkw. Für Lkw mit einem Gesamtgewicht bis zu 25 t werden Brandleistung zwischen 30 MW und 50 MW erwartet. Für Lkw mit einem Gesamtgewicht von 25t bis 50t weisen danach Brandleistungen von 70 MW bis 150 MW auf. Für Tanklastwagen wird eine Brandleistung zwischen 200 und 300 MW erwartet. Im Zuge des FE 03.0437/2007/FRB [27] wurden für Gefahrgutfreisetzung noch deutlich höhere Brandleistungen be-

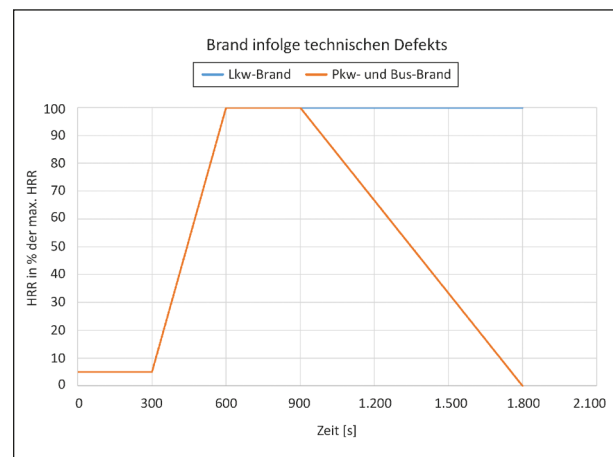


Bild 20: Bemessungskurve für Brand infolge Unfall gemäß VRC Richtlijnen 2009

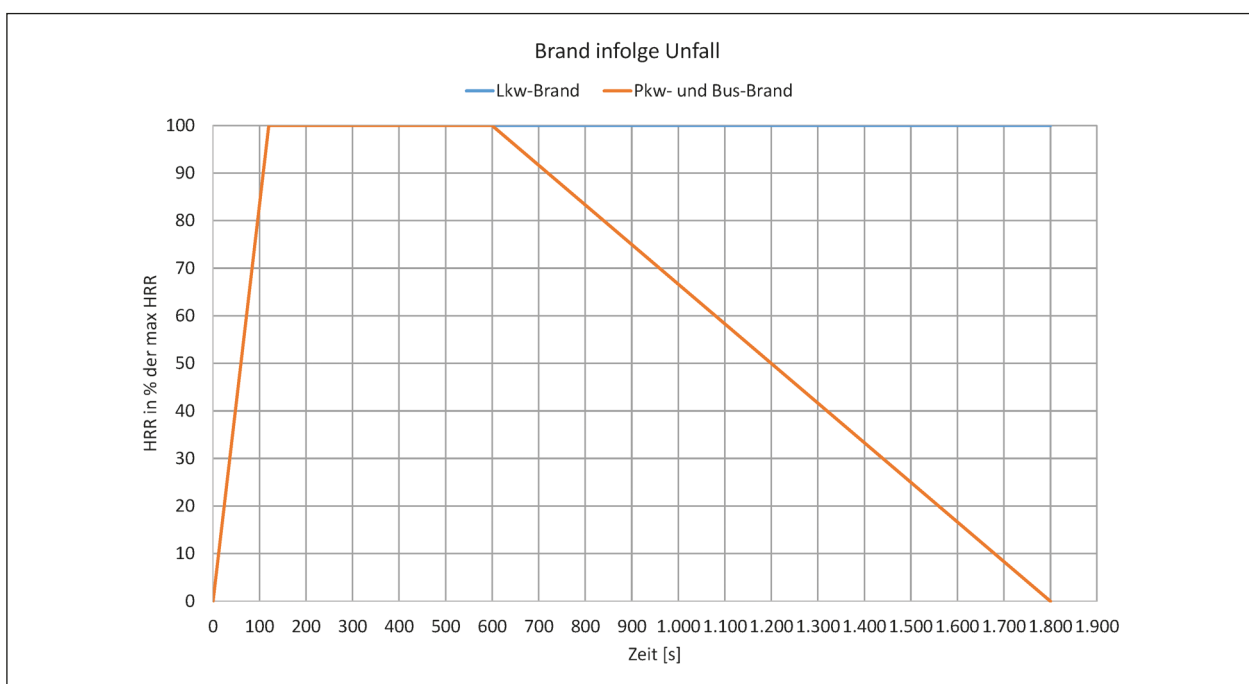


Bild 19: Bemessungskurve für Brand infolge Unfall gemäß VRC Richtlijnen 2009

stimmt. Eine Zusammenstellung der von der PIARC angenommenen Energiefreisetzungsraten enthält Tabelle 24.

Basierend auf den vorangegangenen Erkenntnissen wird zur Abbildung von Bränden im Rahmen von Risikoanalysen eine Differenzierung nach Pkw, Lkw (20 t) und schwerem Lkw (40 t) empfohlen. Für Pkw ist eine Brandleistung von 5 MW zu verwenden. Für Lkw mit einem Gesamtgewicht bis zu 20 t sollte eine Brandleistung von 30 MW und für schwere Lkw mit einem Gesamtgewicht ≥ 40 t eine Brandleistung von 100 MW angenommen werden. In Fällen in denen die Bemessungsbrandleistung für die Auslegung der Lüftung oder einer Brandbekämp-

fungsanlage auf bereits auf 100 MW erfolgt, ist eine weitere Brandlast für Lkw mit einer Brandleistung von ≥ 120 MW mit einzubeziehen.

Da die Phase der Brandentwicklung sehr unterschiedlich lange dauern kann, wird eine Unterscheidung in Szenarien mit einem schnellen und einem verzögerten Brandverlauf erforderlich. Ein schneller Brandverlauf kann sich infolge von Unfällen (Frontalunfall, Kippen, Anprall auf Hindernisse) oder dem Selbstentzünden leicht brennbarer Stoffe und Flüssigkeiten ergeben. Verzögerte Brandentwicklungen können sich infolge technischer Defekte oder vorangegangener Unfälle ergeben.

In Anlehnung an die Bemessungsbrandkurve nach ZTV-ING ist der Anstieg in der Energiefreisetzungsrate (HRR) mit $0,83$ MW/s anzunehmen. Dieser Anstieg ist bis zum Erreichen der jeweiligen fahrzeuggestypischen Brandleistung zu verwenden. Zur Abbildung eines langsamen Brandverlaufs wird nach dem Erreichen des 5 MW Niveaus, diese Brandleistung bis zur 5. Minute konstant gehalten, bevor eine weitere Zunahme in der Energiefreisetzungsrate mit $0,83$ MW erfolgt. Die Dauer der Vollbrandphase erfolgt entsprechend der ZTV-Ing Kurve. Den Vorschlag zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Brandverläufe zeigt Bild 21.

Fahrzeugtyp	Max. Energiefreisetzungsrate [MW]
Pkw	5 – 10
Transporter	15
Bus	20
Lkw bis 25 t*	30 – 50
Lkw 25 t – 50 t*	70 – 150
Tanklastwagen	200 – 300

* Abhängig von Art und Menge der Ladung

Tab. 24: Energiefreisetzungsraten (Quelle: PIARC)

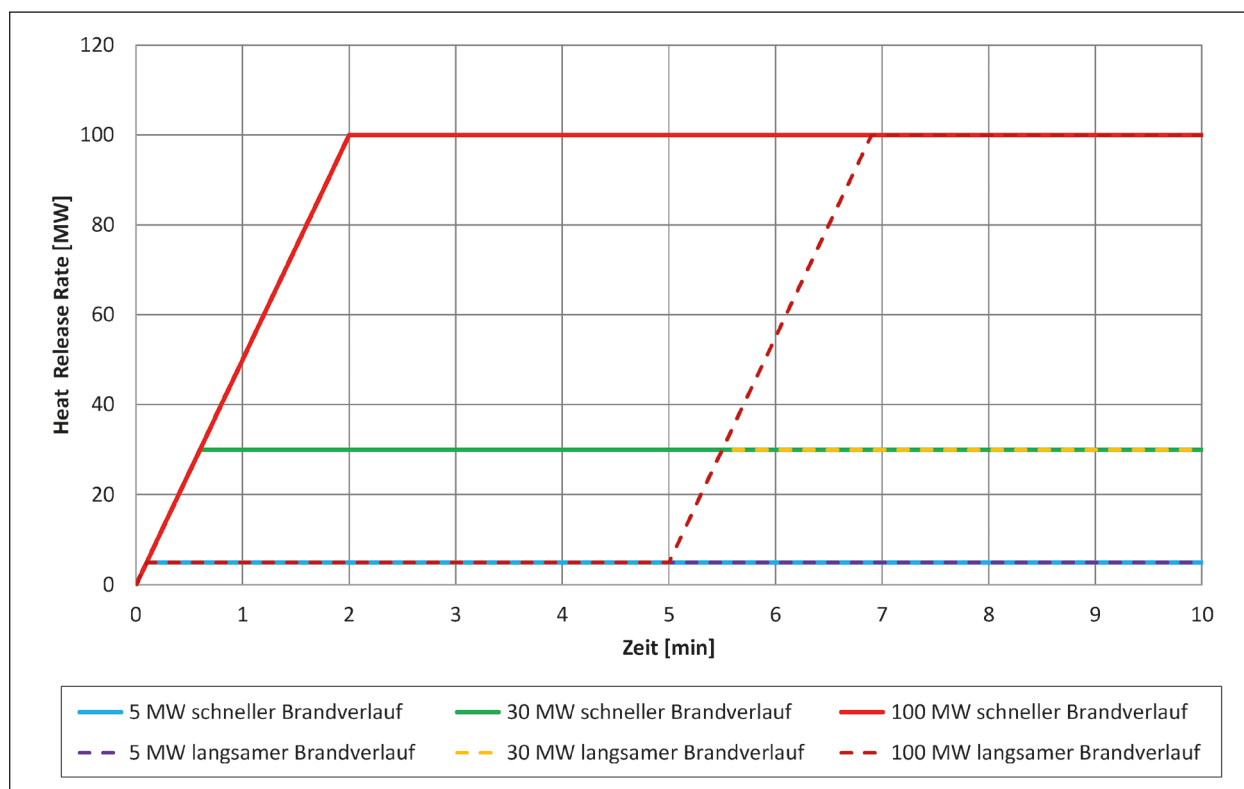


Bild 21: Vorschlag zur Abbildung von Brandleistungen

7.5.3.2 Detektionsverhalten

Das Erkennen und Melden eines Ereignisses (Detektion) mit einer anschließenden Alarmierung der Tunnelnutzer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Selbstrettungsmöglichkeiten und damit auch auf das zu erwartende Schadensausmaß.

Entsprechend den Vorgaben in den EABT ist ein 5 MW-Brand mittels einer automatischen Brandmeldeeinrichtung innerhalb von 60 sec zu detektieren.

Im Rahmen des FE 03.344/2001/FRB [26] wurden mehrere Videosysteme mit automatischer Bildauswertung (Videodetektionssysteme) hinsichtlich ihres Detektionsverhaltens in verschiedenen Testreihen untersucht. Hierbei zeigt sich, dass Brände durch die Systeme innerhalb von 15 sec erkannt werden konnten. Da ein mittels eines Videodetektionssystems erkannter Brand i. d. R. eine Bestätigung durch einen Operator bedarf, wird für eine überprüfte Branderkennung eine Detektionszeit von 30 sec empfohlen.

Neben automatischen Systemen zur direkten Branderkennung stehen innerhalb eines Tunnels auch manuelle Brandmeldeeinrichtungen (Notruf, Betätigung Handfeuermelder) zur Verfügung, über die Tunnelnutzer einen Brand melden können. Es ist davon auszugehen, dass eine Alarmmeldung darüber 2 bis 3 Minuten in Anspruch nimmt.

7.5.3.3 Reaktion von Operatoren

Ein wesentlicher Teil der Zeitschiene neben dem Detektionsverhalten unterschiedlicher technischer Systeme ist weiters die Reaktionszeit von Operatoren. Diese kann mithilfe von Bildschirmaufschaltungen oder Videodetektion (von z. B. stehengebliebenen Fahrzeugen im Tunnel) erheblich verbessert werden.

Hierzu kann beispielsweise zusätzlich zwischen einer Detektion eines Brandes und einer Detektion von z. B. stehengebliebenen Fahrzeugen unterschieden werden. Weiters zeigt die Praxis, dass auch Sichttrübesensoren oftmals schneller einen potenziellen Brand detektieren, als bspw. ein Linienbrandmeldekabel. Ähnliche Ansätze sollen in der Zeitschiene Berücksichtigung finden können.

Dem Forschungsnehmer liegt zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine ausreichende Datengrundlage für erste Ansätze für Reaktionszeiten von Operatoren zugrunde. Im Zuge der weiteren Bearbeitung sollen

hier zusätzliche Informationen eingeholt, bzw. sinnvolle Ansätze festgelegt werden, sodass die Reaktionszeit in der gesamthaften Zeitschiene Platz findet.

7.5.3.4 Aktivierung von Sicherheitseinrichtungen

Die EABT beinhaltet verschiedene Vorgaben im Hinblick auf die Aktivierung von Sicherheitseinrichtungen:

Für Tunnel, die über eine mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren verfügen, müssen die Ventilatoren, deren Aktivierung nach dem zugrundeliegenden Brandprogramm vorgesehen ist, innerhalb von 60 Sekunden nach der Branddetektion ihre Soll Drehzahl erreicht haben.

Im Fall eines Lüftungssystems mit einer Rauchabsaugung über Axialventilatoren, müssen innerhalb von 90 Sekunden die gemäß Brandprogramm erforderlichen Absperr- und Absaugklappen geöffnet sowie die weiteren Klappen geschlossen sein sowie die Ventilatoren ihre Soll Drehzahl erreicht haben.

Sperrschranken müssen innerhalb von 30 Sekunden nach dem Erkennen eines auslösenden Ereignisses eingefahren sein (Annahme für Referenz-tunnel). Im Fall der Detektion eines Brandes über eine automatische Brandmeldeeinrichtung ist ein Einfahren ohne eine weitere Plausibilitätsprüfung zulässig.

7.5.3.5 Befolgungsgrad von Sperr-einrichtungen

Der Einbau einer Schrankenanlage gilt für Tunnel ab 400 m Länge in Deutschland als Standard. Zur Berücksichtigung von Tunneln auch ohne diese Ausstattung sollte die Möglichkeit einer expliziten Bewertung sichergestellt werden.

In Österreich, beispielsweise, ist die Bewertung der Reaktionszeit entsprechend eines Ampelsignals bzw. einer Schrankenanlage eindeutig in der RVS 09.03.11 definiert. Dabei wird auf Basis von Expertenabschätzungen von einer 90-Sekündigen Akzeptanzverzögerung ausgegangen, bis Tunnelnutzer das Rotsignal beachten. Ist der Tunnel im Gegensatz dazu mit einer Schrankenanlage ausgestattet, wird von einer 60-sekündigen Akzeptanzverzögerung ausgegangen (Quelle: ASFINAG, Ratte). Die zusätzlichen 30 Sekunden, welche im Falle

einer installierten Ampelanlage zu berücksichtigen sind, wirken sich negativ auf das Schadensausmaß aus, da Verkehrsteilnehmer länger in den Tunnel einfahren und dementsprechend mehr Personen in der Nähe der Gefahrenzone sind. Daher kann von einer hohen Zweckmäßigkeit einer solchen Bewertungsmaßnahme ausgegangen werden.

Dieser Ansatz kann in der bestehenden Bewertungsmethodik als Best-Practice angeführt werden, jedoch in umgekehrter Herangehensweise. Da in Deutschland eine Schrankenanlage für den Großteil der Tunnelanlagen zum Standard gem. RABT/EABT [2][3] zählt, kann dieser für die Bewertung von z. B. Tunneln unter 400 m oder mit abweichender Ausstattung herangezogen werden. Ziel ist es, in die Zeitschiene einen entsprechenden Ansatz aufzunehmen, um unterschiedliche Befolungsgrade von Sperreinrichtungen und unterschiedliche Sperrzeiten (z. B. unterschiedlicher Sperrsysteme) zu bewerten.

7.5.3.6 Reaktion von Tunnelnutzern

Das Ausfallen oder Versagen unterschiedlichster Tunneleinrichtung wird explizit in Risikoanalysen bewertet. Im Gegensatz dazu wird das Verhalten der Tunnelnutzer jedoch immer als genau richtig und situationsgerecht angenommen. Die Realität zeigt indessen einige wesentliche Unterschiede beim Verhalten von flüchtenden Personen in Stresssituationen. Diese sind u. a. auch auf die unterschiedlichen Alarmierungssysteme im Tunnel zurückzuführen.

Zur Berücksichtigung dieser Aspekte kann eine Analyse von Videoaufzeichnungen adäquater Unfallhergänge bzw. Unfallberichten bzw. auf die Erfahrung von Tunneloperatoren zurückgegriffen werden. Ebenso bieten Probandenversuche [33] und [34] erste Ansätze. Ziel ist es, in die Zeitschiene einen entsprechenden Ansatz aufzunehmen, um unterschiedliche Reaktionszeiten bei einem Brand bzw. nach Brandalarm im Tunnel aufzunehmen und zu bewerten. Dies ist im Wesentlichen im Zusammenhang mit den verbauten Sicherheitssystemen zu sehen.

7.5.4 Selbstrettung

7.5.4.1 Festlegung von Modellansätzen

7.5.4.1.1 Makroskopischer Modellansatz

Im Ereignisfall wird eine erfolgreiche Selbstrettung der Tunnelnutzer in sichere Bereiche maßgeblich durch die lokal vorherrschenden Umgebungsbedingungen bestimmt. Als Maß zur Abschätzung der Fluchtbedingungen können die Fractional Effective Dose (FED) Werte herangezogen werden. Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen Berechnungen lassen sich darüber in Abhängigkeit von der Fluchtgeschwindigkeit und den gegebenen Fluchtweglängen Bereiche ableiten, aus denen unter den gegebenen Randbedingungen eine erfolgreiche Selbstrettung oder nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung möglich ist.

Sind für einen Tunnelnutzer noch ausreichende Umgebungsbedingungen vorhanden, so wird eine Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Werden dagegen die Grenzwerte hinsichtlich äußerer Einwirkungen unterschritten, so ist davon auszugehen, dass keine weitere Fortbewegung möglich ist und die Selbstrettung fehlschlägt.

Bereiche mit erfolgreicher Selbstrettung ergeben sich aus dem Weg, der bei der angenommenen Fluchtgeschwindigkeit durch den Tunnelnutzer zum nächstgelegenen Notausgang bzw. Portal bei unverzüglichem Einleiten der Flucht nach Alarmauslösung ohne eine Behinderung durch äußere Einwirkungen zurückgelegt werden 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 bezeichnet. Keine Selbstrettung ist schließlich aus den Bereichen möglich, aus denen bei der zugrunde liegenden Fluchtgeschwindigkeit ein Notausgang bzw. ein Portal nicht mehr sicher erreicht werden kann. Bild 22 zeigt exemplarisch die Ermittlung der verschiedenen Selbstrettungsbereiche bei einem Notausgangsabstand von 150 m.

Zur Bestimmung der Schadensausmaße werden Aussagen zur Anzahl und Verteilung von Personen innerhalb des Tunnels erforderlich. Diese ist im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig:

- Verkehrsaufkommen (DTV)
- Anzahl Fahrstreifen
- Fahrzeugdichte bei freiem Verkehr und Stau

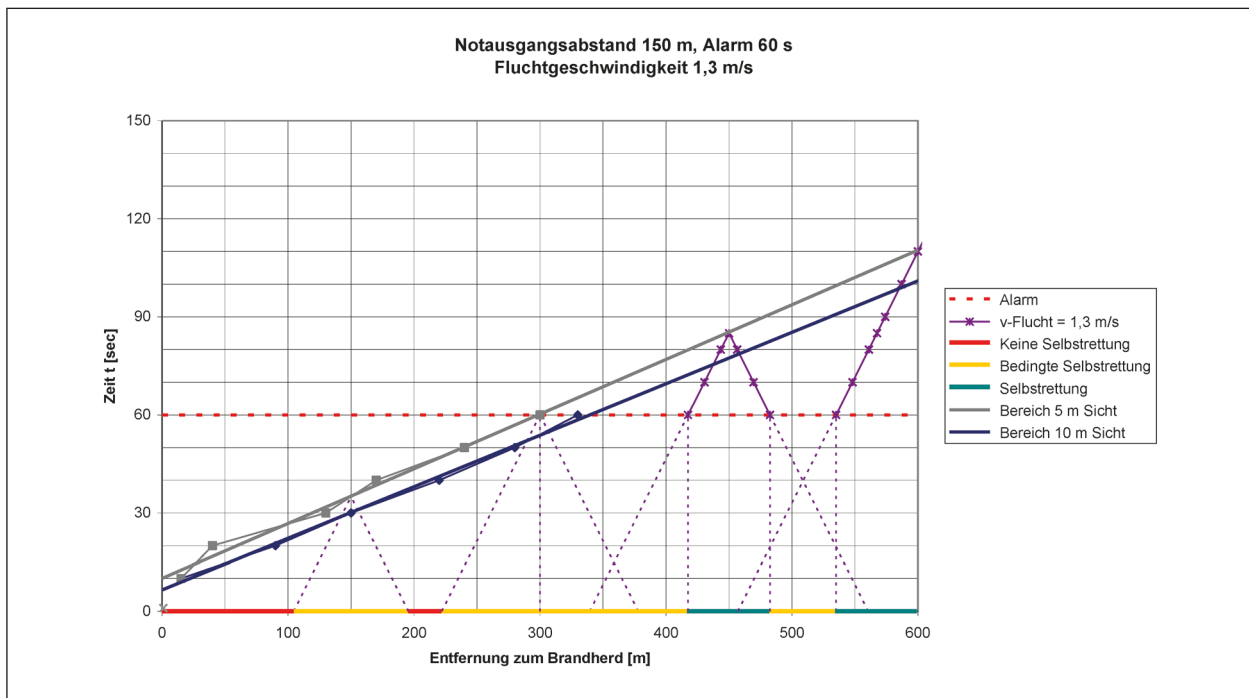


Bild 22: Selbstrettungsbereiche [12]

- Fahrzeugbelegungsgrad
- Zeit zwischen Ereigniseintritt und Tunnelspernung

Die Berechnung der daraus resultierenden Personendichte kann über die Theorie der kinematischen Wellen oder mithilfe eines Verkehrsflusssimulationsprogramms ermittelt werden. Durch die Überlagerung der ermittelten Personendichten mit den vorher bestimmten Bereichen für „Selbstrettung“, „bedingte Selbstrettung“ und „keine Selbstrettung“ kann dann das Schadensausmaß ermittelt werden. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung kann angenommen werden, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

Von Vorteil ist bei dieser Methode, dass sie relativ einfach in der Handhabung ist und die Berechnungen der Schadensausmaßermittlung mit äußerst geringem zeitlichem Aufwand durchgeführt werden können, wenn die Einwirkgrößen bekannt sind. Ferner lassen sich die Ergebnisse klar und transparent darstellen. Nachteilig ist, dass nur ein Gesamtkollektiv mit vertretbarem Aufwand abbildbar ist und individuelle Mobilitätsparameter daher keine Berücksichtigung finden. Des Weiteren starten systembedingt alle Personen gleichzeitig mit der Evakuierung. Außerdem lassen sich Maßnahmen, die auf die Wahrnehmung und Orientierung sowie auf die Beeinflussung des Verhaltens abzielen, nicht abbil-

den. Im Fall von verzweigten Tunnelsystemen stößt die Anwendung dieser Methode an ihre Grenzen, da die zeitliche Synchronisation der Flucht und Evakuierungsvorgänge in den einzelnen Tunnelzweigen sehr aufwendig werden kann.

7.5.4.1.2 Mikroskopischer Modellansatz

Mikroskopische Evakuierungsmodelle bilden Bewegungsvorgänge von einzelnen Personen unter Berücksichtigung von äußeren Einwirkungen ab. Grundlage zur Berücksichtigung von Einwirkgrößen, wie Druck, Wärme, Brandgase und Rauch, bilden die Ergebnisse aus CFD-Berechnungen. Die Bewegungsmöglichkeiten innerhalb einer Bauwerksstruktur bzw. im Freien werden über Laufflächen abgebildet. Neben ebenen Laufflächen stehen i. d. R. auch Elemente zur Modellierung von Treppen, Rolltreppen, Aufzüge etc. zur Verfügung. Dadurch lassen sich Evakuierungsvorgänge auch aus äußerst komplexen, großräumigen Strukturen abbilden.

Zur Berücksichtigung individueller Personeneigenschaften lassen sich unterschiedliche Personenmodelle generieren bzw. werden durch das jeweilige Modell bereits vordefiniert bereitgestellt. In den Personeneigenschaften kann unterschieden werden nach Geschlecht, Alter, Körpergröße, Gehgeschwindigkeit (Wunschgeschwindigkeit), Verhalten,

Platzbedarf, Mobilitätseinschränkungen etc. Die Zuweisung der Personeneigenschaften an die individuellen Personenmodelle erfolgt über entsprechende Verteilungsfunktionen. Neben der Anfangsverteilung der Personen lassen sich oftmals auch individuelle Entscheidungen zufallsgesteuert vorgeben, sodass man unterschiedliche Ergebnisse für dasselbe Szenario bei einer mehrfachen Berechnung erhalten kann. Dies kann dazu beitragen, verborgene Schwachstellen im Sicherheitskonzept aufzudecken.

Die Schadensausmaße werden i. d. R. für jede Person individuell über die Methode der Fractional Effective Doses (FED) ermittelt. Mit Abschluss der Simulationsrechnung liegt somit das Ergebnis über die Personenschäden direkt vor.

Vorteilhaft bei der Verwendung eines mikroskopischen Modells ist die große Flexibilität in der Anwendung bei komplexen Strukturen. Durch die Berücksichtigung individueller Personeneigenschaften wird außerdem eine sehr hohe Realitätsnähe bei der Abbildung von Evakuierungsvorgängen erzielt und kann bei der Schwachstellenanalyse äußerst hilfreich sein. Außerdem werden komplexe Bewegungsvorgänge, wie z. B. Gegenströme, Stau vor Ausgängen etc. abbildbar. Von Nachteil ist der gegenüber den makroskopischen Modellen deutlich höhere Modellierungs- und Rechenaufwand. Einen Überblick über verschiedene mikroskopische Modelle gibt nachfolgende Auflistung:

- FDS+EVAC
- Pathfinder
- Viswalk
- EXODUS
- Legion
- SIMULEX
- ESCAPES

7.5.4.2 Zusätzliche Modellanforderungen

Das aktuelle Risikomodell sieht die Modellierung der Selbstrettung anhand eines Fluchtmodells auf Basis einer festen Bewegungsgeschwindigkeit für zwei mögliche Zeitpunkte der Fluchteinleitung vor. Um eine höhere Genauigkeit in der Abbildung der Selbstrettungschancen und der Auswirkungen eines Tunnelbrandes auf flüchtende Personen zu er-

möglichen, ist es unter Umständen sinnvoll, Parameterverteilungen anstelle von festen Parameterwerten zu verwenden.

Zudem ist aus Probandenversuchen aber auch aus realen Tunnelereignissen bekannt, dass Tunnelnutzer nicht zu 100 % das vorgegebene bzw. erwünschte Fluchtverhalten an den Tag legen. Auch dies sollte in der Modellierung berücksichtigt werden, sofern sich aus dem abweichenden Verhalten ein Einfluss auf die Risikobewertung bzw. die Wirksamkeit von Maßnahmen ergibt.

Das bisher vorgegebene, rein sichtweitebasierte Fluchtmodell ermöglicht eine nachvollziehbare Darstellung der Ergebnisse der Fluchtsimulation, besitzt jedoch Nachteile in der Genauigkeit der Modellierung. Alternativ dazu werden für Brandsicherheitsbewertungen vielfach akkumulationsbasierte Fluchtmodelle verwendet. Diese haben zudem den Vorteil, verschiedene toxische Verbrennungsprodukte bewerten zu können. Der steigende Anteil an alternativ angetriebenen Fahrzeugen am Gesamtverkehr macht es notwendig, die besonderen Gefährdungen, die mit einem Brand derartiger Fahrzeuge einhergehen, zu bewerten. Vor allem batteriebetriebene Fahrzeuge, die momentan den bei weitem größten Teil der alternativen Fahrzeuge ausmachen, sind infolge einer erhöhten Freisetzung von toxischen Stoffen, insbesondere Fluorwasserstoff, von zentraler Bedeutung für die Gefährdung von Personen im Tunnel. Die Bewertung von Bränden derartiger Fahrzeuge macht daher die Berücksichtigung der toxischen Wirkung und damit die Erweiterung des rein sichtweitebasierten Fluchtmodells notwendig.

Die angeführten Adaptierungsanforderungen an das Fluchtmodell werden im Folgenden genauer diskutiert.

7.5.4.3 Akkumulationsbasierte Fluchtmodelle

Das Ziel des Fluchtmodells in einer Tunnelrisikanalyse ist die möglichst realistische Bewertung der Auswirkungen eines Tunnelbrandes auf die im Tunnel befindlichen Personen. Dafür ist es notwendig, die auftretenden Effekte realitätsnah abzubilden. Das aktuelle Risikomodell sieht die Bewertung einer erfolgreichen oder fehlgeschlagenen Flucht ausschließlich auf Basis der Sichtweite vor. Neben der eingeschränkten Sicht infolge dichten Rauchs ist aber auch die Exposition der Flüchtenden gegenüber hohen Temperaturen und toxischen oder

reizenden Verbrennungsproduktion für die Bewegungseinschränkung und schließlich den Tod verantwortlich. Jüngste Forschungsergebnisse anhand von Probandenversuchen in vollständig abgedunkelten Tunnelanlagen zeigen außerdem, dass die für lange Zeit allgemein verbreitete Annahme des „Stehenbleibens“ von Flüchtenden auf Grund von fehlender Sicht, überdacht werden muss. Probandenversuche in Japan zeigten Fluchtgeschwindigkeiten, die selbst bei vollständiger Abdunkelung 0,4 m/s nicht unterschritten [34].

Es ist gängige Praxis, die Auswirkungen eines Brandes in Untersuchungen zur Brandsicherheit über Intoxikationsmodelle (Fractional Effective Dose, bzw. Fractional Effective Concentration) in Verbindung mit veränderlichen Fluchtgeschwindigkeiten infolge eingeschränkter Sicht bzw. hoher Reizgaskonzentrationen, zu modellieren, vgl. [10] [35] [36] [37].

Dieser Ansatz der Modellierung ist nicht nur wesentlich realitätsnäher, sondern auch deutlich robuster gegenüber kurzzeitigen Schwankungen der Rauchgaskonzentration. Zeitlich begrenzte Effekte, wie etwa Turbulenzen infolge der Aktivierung von Strahlventilatoren oder ein vorübergehendes Absinken der Längsströmungsgeschwindigkeit, können zur kurzzeitigen Erhöhung der Rauchdichte und einer damit verbundenen Unterschreitung der Mindestsichtweite führen. Nach aktueller Methodik würden diese Bereiche als Bereiche, aus denen nur eine bedingte bzw. keine Selbstrettung möglich ist, gewertet. Daraus würde sich wiederum ein entsprechendes Schadensausmaß ableiten. Demgegenüber wäre bei einem realen Brand die Selbstrettung durch eine vorübergehende Einschränkung der Sicht auch nur vorübergehend beeinträchtigt und das tatsächlich zu erwartende Schadensausmaß daher mit hoher Wahrscheinlichkeit deutlich geringer.

7.5.4.4 Fluchtgeschwindigkeiten

Im deutschen Risikomodell wird die Flucht von Tunnelnutzern entsprechend zwei unterschiedlicher Fluchtzeitpunkte modelliert. Dabei wird für jede einzelne flüchtende Person eine konstante Fluchtgeschwindigkeit von 1,3 m/s angenommen. Sobald die individuelle Sichtweite auf unter 5 m absinkt wird der Fluchtvorgang dieser Person als beendet angenommen.

In Regelwerken wie z. B. [38] [39] wird das Thema der individuellen Fluchtgeschwindigkeiten intensiv

diskutiert, wobei in diesen Diskussionen die unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch Geschlecht, Alter, körperlichem Allgemeinzustand, usw. definiert sind. Aus Probandenversuchen wie z. B. Ref. [33], sowie tatsächlichen Tunnelereignissen ist abzuleiten, dass die Fluchtgeschwindigkeit von einer Vielzahl an weiteren Parametern beeinflusst wird. Demzufolge hätte die Berücksichtigung einiger dieser Parameter im Fluchtmodell eine realitätsnähere Abbildung zur Folge.

Im Gegensatz zum deutschen Risikomodell werden im österreichischen TuRisMo [8] wesentliche Komponenten, die eine realitätsnahe Abbildung des Fluchtverhaltens der im Tunnel befindlichen Personen ermöglichen, mitberücksichtigt. Demzufolge wird der Fluchtbeginn von Personen zwischen dem (individuellen) Zeitpunkt einer wahrnehmbaren Bedrohung (z. B. schlechte Sicht) oder dem Zeitpunkt der Alarmierung variiert. Zusätzlich wird von einem prozentuellen Anteil an Personen ausgegangen, welche im Fahrzeug verbleiben, also nicht flüchten. Des Weiteren werden unterschiedliche Fluchtgeschwindigkeiten – entsprechend unterschiedlicher Personengruppen (Männer – Frauen, alt – jung) – angenommen, wobei hierbei auch die variierenden Sichtbedingungen durch den Brandrauch sowie die toxische Wirkung der Rauchgase mitberücksichtigt werden.

7.5.4.5 Wahrnehmung von Sicherheitseinrichtungen/Gefahren

Die Fluchtbedingungen, insbesondere der Zeitpunkt, an dem die Flucht eingeleitet wird, hängt eng mit dem vorhandenen Wissen über installierte Sicherheitseinrichtungen und dem damit in Verbindung stehenden richtigen Verhalten in Notfallsituationen zusammen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass die installierten Sicherheitseinrichtungen die Wahrnehmung sowie das Verhalten der Tunnelnutzern beeinflusst [25], was wiederum in der Risikoanalyse – im Evakuierungsmodell – mitberücksichtigt werden sollte. Wiewohl diese Einflüsse in die RA einfließen sollten, hängt die Implementierung letztgenannter Punkte von der Datengrundlage ab. Da diese nicht in geeignetem Maße vorhanden ist, ist die Implementierung solcher detaillierter Ansätze im gegenständlichen Projekt nicht möglich.

Es soll aber ausdrücklich festgehalten werden, dass das Evakuierungsmodell entsprechend flexibel gestaltet werden soll, um eine Implementierung, beim

Vorhandensein der Datengrundlage, im Nachhinein noch möglich zu machen.

7.5.4.6 Fehlverhalten bei der Flucht

Im Gegensatz zum deutschen Risikomodell werden im österreichischen TuRisMo [8] wesentliche Komponenten, die eine realitätsnahe Abbildung des Fluchtverhaltens der im Tunnel befindlichen Personen ermöglichen, mitberücksichtigt. Unter anderem wird von einem prozentuellen Anteil an Personen ausgegangen, welche im Fahrzeug verbleiben, also nicht flüchten.

Das Fluchtverhalten von Tunnelnutzern wurde in einem BASt Forschungsvorhaben untersucht [25]. Darin wurde im Speziellen der Einfluss einer aktivierten BBA auf das Fluchtverhalten von Personen im Tunnel studiert. Resultierend aus dieser Studie konnten Schlüsse bezüglich der akustischen Evakuierungsdurchsage, dem Einfluss der BBA auf die Wahrnehmung sowie auf das Verhalten bzw. das Fehlverhalten von Tunnelnutzern gezogen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein 100%iges regelkonformes Fluchtverhalten von Tunnelnutzern nicht angenommen werden darf. Um den Evakuierungsvorgang in einer Gefahrensituation möglichst realistisch abbilden zu können, wird die explizite Mitberücksichtigung von Tunnelnutzern, welche nicht aussteigen oder am Fahrzeug stehenbleiben, empfohlen.

7.5.4.7 Einfluss mobilitätseingeschränkter Personen

Wie bereits in Kapitel 7.5.4.6 diskutiert, ist die Berücksichtigung von Personen die, anstatt zu flüchten, im Fahrzeug verweilen, von großer Bedeutung. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass sich alle Tunnelnutzern regelkonform verhalten bzw. verhalten können. Unter gewissen Voraussetzungen ist die Flucht für eine Person mit eingeschränkter Mobilität nicht möglich und sie ist gezwungen im Fahrzeug zu bleiben. Dabei sind potenziell negative Einflüsse auf mobilitätseingeschränkte Personen (wie z. B. temporäre Betonleitwände bspw. zur Richtungsverkehrstrennung) allenfalls zu berücksichtigen.

7.5.4.8 Berücksichtigung von Maßnahmen zur Unterstützung der Fremdrettung

Um Maßnahmen zur Unterstützung der Fremdrettung im Brandfall zu berücksichtigen, kann z. B. die

Voraussetzungen für Feuerwehreinsatz	Wahrscheinlichkeit Vollbrand
Günstige Voraussetzungen (Anfahrtsdauer < 5 Minuten)	0,1
Durchschnittliche Voraussetzungen (Anfahrtsdauer 15 Minuten)	0,2
Ungünstige Voraussetzungen (Anfahrtsdauer > 25 Minuten)	1,0

Tab. 25: Modifikation der Wahrscheinlichkeit eines Vollbrandes, nach Tabelle 38 aus Ref. [9]

entsprechend hinterlegte Brandkurve in der Schadensausmaßberechnung abgeändert werden, siehe Kapitel 7.5.3.1.

Im österreichischen Tunnel-Risiko-Modell ist es allerdings auch möglich, direkt im Ereignisbaum die Wahrscheinlichkeit für einen Vollbrand des gesamten Fahrzeuges entsprechend günstiger bzw. ungünstiger Voraussetzungen eines Feuerwehreinsatzes zu adaptieren. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit eines Vollbrandes in Abhängigkeit von den Voraussetzungen für einen Feuerwehreinsatz entsprechend Tabelle 25 modifiziert. Hierbei werden die relativen Häufigkeiten von Brandgrößen (5, 30 und 100 MW) entsprechend der Feuerwehranfahrtsdauer angepasst. Bei dieser Variante sind keine zusätzlichen detaillierten CFD-Simulationen erforderlich.

7.5.5 Fremdrettung

In den bisherigen Betrachtungen wurde der Einfluss der Fremdrettung nicht berücksichtigt, weil sie in Heft B66 nicht vorgesehen sind. Dennoch zeigt die Fremdrettung großen Einfluss auf das Sicherheitsniveau eines Tunnels und sollte zur Abbildung des Sicherheitsniveaus berücksichtigt werden.

Neben einem Löschtrupp für die aktive Brandbekämpfung werden auch Bergungstrupps zur Rettung von Tunnelnutzern eingesetzt. Zwischen den beiden Faktoren Brandbekämpfung und Personenrettung ist grundsätzlich zu differenzieren.

7.5.5.1 Brandbekämpfung

Im Gegensatz zur Tunnelventilation, die lediglich auf die Folgen eines Brandereignisses, den freigesetzten Rauch-, Schadgas- und Wärmemengen, einwirken kann, besteht mit der Feuerwehr die Möglichkeit, die Ursache der Gefährdung, den Brand selbst, zu bekämpfen. Dies kann bis zum völligen

Erlöschen eines Brandes reichen. Wesentliche Eigenschaften im Löscheinsatz sind dabei:

- Sofortige Kühlung durch den Einsatz von Wasser, was zu einer Temperaturreduktion führt
- Reduktion der Energiefreisetzung bzw. Löschen des Brandes und damit auch der freigesetzten Wärme- und Rauchgasmenge

Beides verbessert die Fluchtbedingungen der Tunnelnutzer. Zusätzlich wird durch die Kühlung der Tunnelschale, besonders der Tunneldecke, eine Begrenzung von Schäden an der Bauwerksstruktur erzielt. Eine Brandausbreitung inklusive Feuerüberschlag auf weitere Fahrzeuge im Einflussbereich des Brandes kann damit verhindert werden, was gerade in Tunneln mit hohem Lkw-Aufkommen eine zusätzliche Gefährdung bedeuten kann.

Um den Einfluss der Brandbekämpfung zu berücksichtigen, ist in Abhängigkeit der Eintreffzeit am Ereignisort und dem Beginn der Löschmaßnahmen die Löschwirkung durch die Beaufschlagung mit einer Wassermenge von 1.200 l/min abzubilden. Die Wassermenge entspricht hierbei der bereitzustellenden Durchflussrate nach RABT/EABT.

7.5.5.2 Personenrettung

Neben der Brandbekämpfung kommt den Rettungskräften auch die Aufgabe der Personenrettung zu. Dies gilt beispielsweise für Personen, die ihr Bewusstsein verloren haben oder mobilitätseingeschränkt sind und ihr Fahrzeug nicht selbständig verlassen können. Eine schnelle Rettung dieser Personen führt zur Reduktion von Schadensausmaßen.

Die mit dem individuellen Eintreffen der Feuerwehr verbundenen Auswirkungen auf die Eintreffwahrscheinlichkeiten und Ausmaßminderungseffekte sind jeweils für den zu betrachtenden Tunnel zu bestimmen.

8 Prüfung der Auswirkungen des Adaptierungsvorschlages

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der vorgeschlagenen Adaptierungen untersucht. Dabei wird das bisherige Sicherheitsniveau eines Referenztunnels gemäß den Vorgaben in Heft B66 den Berechnungen für einen Modelltunnel unter Berücksichtigung der neuen Modellparameter bzw. Auswertungsansätze gegenübergestellt. Im Vordergrund steht dabei der vergleichende Ansatz, um Risikounterschiede zu bewerten. Der Fokus im Rahmen des Forschungsauftrages lag dabei in der Darstellung der Auswirkungen durch die Methodik, nicht in den Auswirkungen von unterschiedlichen Parametern im Sinne einer Parameterstudie. Aufgrund der vielen Einflussparameter und der damit verbundenen Anzahl an Variationen ist eine vollständige Betrachtung nicht möglich.

Die Betrachtung stellt eine exemplarische Darstellung dar und muss für jede Risikoanalyse an die jeweiligen Randbedingungen und Fragestellungen individuell angepasst werden. Zur Anwendung der Methodik lag den Vergleichsrechnungen ein Richtungsverkehrstunnel zugrunde. Für einen Gegenverkehrstunnel würden sich demgegenüber im methodischen Ablauf keine Änderungen ergeben.

Im Rahmen der im Schlussbericht dargestellten Risikoermittlung wurden die Schadenerwartungswerte für Unfälle und Brandereignisse transparent dargestellt, sodass sich eine Variation von Parametern, die sich auf die Eintrittshäufigkeiten von Ereignissen beziehen, durch den Leser selbst ableiten lassen.

8.1 Grundparameter

Nachfolgende Tabelle 26 zeigt die Grundparameter für den Referenztunnel gemäß Heft B66 sowie den Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag. Anhand dieser Grundparameter lassen sich in Kombination mit Unfall- und Brandraten Eintrittshäufigkeiten von Ereignissen bestimmen.

Die Parameter werden in beiden Untersuchungsfällen gleich angesetzt, sodass sich die Unterschiede im Sicherheitsniveau nur aus den weiteren Modellannahmen ergeben.

Zur Darstellung der Auswirkungen der beabsichtigten Modellanpassungen werden nachfolgend die

Parameter	Werte für beide Referenztunnel
Infrastruktur	
Tunnellänge	1.200 m
Verkehrsart	Richtungsverkehr
Anzahl Fahrstreifen pro Richtung (Regelquerschnitt)	2 (RQ 31 t)
Zu- und Abfahrten	Nicht vorhanden
Seitenstreifen	Nicht vorhanden
Fahrstreifenbreite	≥ 3,50 m
Querschnittshöhe	5,5 m
Längsneigung	-3,0 %
Lüftungssystem	Längslüftung (30 MW Bemessungsbrandleistung)
Notausgangabstand	300 m
Verkehr	
DTV pro Tunnelröhre	20.000 Kfz/d
Schwerverkehrsanteil	15 %
Zulässige Höchstgeschwindigkeit	80 km/h
Ereignis	
Brandort	Mitte Tunnel (am Notausgang)
Brandleistung	5/30/100 MW

Tab. 26: Grundparameter

Ereignishäufigkeiten und zugehörigen Schadensausmaße einzeln bestimmt. Die damit berechneten Risikowerte aus dem Verfahren gemäß Heft B66 werden dann dem neuen Modellansatz gegenübergestellt.

8.2 Häufigkeitsermittlung

8.2.1 Eintrittshäufigkeit für ein Initialereignis

Maßgeblichen Einfluss auf die Risikoermittlung hat die Wahl der Initialereignisse. Sowohl in Heft B66 als auch im Adaptierungsvorschlag finden folgende auslösende Ereignisse hierbei Berücksichtigung.

- Unfall
- Unfall mit Brandwirkung
- Technischer Defekt mit Brandwirkung

Es ergeben sich dabei Unterschiede in den Eintrittshäufigkeiten für das jeweilige Initialereignis wie in nachfolgender Tabelle 27 dargestellt. Sie basieren auf statistischen Angaben abgeleitet aus den Unfallereignissen aus Heft B66 bzw. den erweiterten Auswertungen im Rahmen des Adaptierungsvorschlags.

Initialereignis (Top Event)		Referenztunnel (Heft B66)	Referenztunnel (Adaptierungsvorschlag)
[0.1]	Initialereignis Kollision (ohne Brand)	Beim Initialereignis Kollision handelt es sich um die Häufigkeit eines zu erwartenden Unfalls Auf Basis der relevanten Angaben zum Tunnel wird für den Referenztunnel gemäß Heft B66 im Richtungsverkehr eine Unfallrate von $2,28E-07$ [$1/\text{Fzg} \cdot \text{km}$] pro Jahr angenommen, die dem Grundwert für Richtungsverkehrstunnel ohne Ein- und Ausfahrten entspricht	Gemäß Adaptierungsvorschlag wird eine Basisunfallrate von $1,6E-07$ [$1/\text{Fzg} \cdot \text{km}$] pro Jahr genutzt. Hier sind auch die Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit zu berücksichtigen. Der Einfluss der Tunnellänge führt zu einer korrigierten Unfallrate von $1,12E-07$ [$1/\text{Fzg} \cdot \text{km}$] pro Jahr.
[0.2]	Initialereignis Brand infolge Kollision	In Heft B66 (Referenztunnel) wird davon ausgegangen, dass in 0,3 % der Unfälle mit einem Kfz-Brand zu rechnen ist. Es wird davon ausgegangen, dass sämtliche Brände infolge Unfällen zu schnell ablaufenden Brandereignissen führen.	Dieser Wert ist auch anhand der Brandauswertungen der für den Adaptierungsvorschlag durchgeführten Unfallereignisse bestätigt worden und wird daher auch im Adaptierungsvorschlag genutzt.
[0.3]	Initialereignis Brand infolge Selbstzündung	Beim Initialereignis Selbstzündung handelt es sich um einen Kfz-Brand infolge eines technischen Defekts. Die entsprechende Häufigkeit eines Fahrzeugbrandes resultiert aus der in Heft B66 hergeleiteten Brandrate von $3,0 \cdot 10^{-9}$ [$1/\text{Fahrzeug} \cdot \text{km}$]. In Heft B66 wird keine Unterscheidung im Brandverlauf vorgenommen	Die Brandrate wird analog auch im Adaptierungsvorschlag genutzt und repräsentiert dort vorrangig verzögerte Brandverläufe. Es wird angenommen, dass Brände infolge von Selbstzündung in 90 % der Fälle verzögert ablaufen. Dementsprechend sind 10 % einem schnellen Brandverlauf zuzuordnen.

Tab. 27: Häufigkeiten H0 von Initialereignissen

Parameter	Referenz tunnel (Heft B66)	Referenz tunnel (Anpassungsvorschlag)
Tunnellänge [m]	1.200	1.200
Unfallrate [1/Fzg.*km]	2,28E-07	1,6E-07
Einflussfaktoren Unfallhäufigkeit	- (1)	0,7
Korrigierte Unfallrate [1/Fzg.*km]	2,28E-07	1,12E-07
DTV pro Tunnelröhre [Kfz/d]	20.000	20.000
Bezugszeitraum [a]	1	1
Erwartete Unfälle pro Jahr	2,00	0,98
Ereignis Brand infolge Kollision (100 % schneller Brandverlauf) [-]	5,99E-03	2,94E-03
Ereignis Brand infolge technischem Defekt (100 % schneller Brandverlauf) [-]	2,63E-02	-
Ereignis Brand infolge technischem Defekt (10 % schneller Brandverlauf) [-]	-	2,63E-03
Ereignis Brand infolge technischem Defekt (90 % verzögerter Brandverlauf) [-]	-	2,37E-02
Initialereignis Brand gesamt [-]	3,23E-02	2,92E-02
Anteil am Gesamtbrandrisiko Brand infolge Kollision [-]	19 %	19 %
Anteil am Gesamtbrandrisiko Brand infolge techn. Defekt [-]	81 %	81 %

Tab. 28: Verteilung Häufigkeiten der Brandereignisse

Ausgehend von diesen Werten ergeben sich die in Tabelle 28 aufgelisteten Häufigkeitsverteilungen für die Brandereignisse.

Im Verfahren gemäß Heft B66 wurden keine Einflussfaktoren auf die Unfallhäufigkeit bestimmt. Für den Referenz tunnel gem. Anpassungsvorschlag ergibt sich aufgrund der Tunnellänge ein risikomindernder Einflussfaktor von 0,7.

Es ist zu beachten, dass beim Referenz tunnel nach Heft B66 nur ein schneller Brandverlauf berücksichtigt ist. Im Anpassungsvorschlag wird eine Unterscheidung in schnell und verzögert vorgenommen (siehe Bild 21). Es wird davon ausgegangen, dass Brände infolge von Unfällen generell als schnell ablaufende Brandereignisse zu werten sind. Bei den Bränden infolge von technischem Defekt wird deren Anteil nur auf 10 % geschätzt. Dies führt zu einer Verteilung von schnell bzw. verzögert ablaufenden Branden von 19 % zu 81 %.

8.2.2 Ermittlung der Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i im Ereignisablauf

Die Quantifizierung der Häufigkeiten der Endzustände erfordert Kenntnis über die Verzweigungswahrscheinlichkeiten im Ereignisablauf. Zu unterscheiden ist hierbei prinzipiell zwischen den Ereignisabläufen infolge Brand und Kollision als Initialereignis.

8.2.2.1 Verzweigungswahrscheinlichkeiten P_i infolge Kollision

Charakteristisch für Unfälle in Straßenverkehrstunneln ist das Auftreten folgender Unfalltypen:

- Unfalltyp 1: Fahrnfall
(Selbstunfall z. B. Kollision mit der Tunnelinfrastruktur)
- Unfalltyp 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall
(Kollision bei einer Zu-/Abfahrt im Tunnel)
- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr
(Auffahrkollision oder Kollision bei einem Spurwechsel in einem Richtungsverkehrstunnel)
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall
(z. B. Kollision mit einem Gegenstand, plötzliches körperliches Unvermögen, Versagen am Fahrzeug)

Tabelle 29 gibt die angesetzten Verzweigungswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von dem jeweiligen Unfalltyp und dem zu erwartenden Schadensmaß wieder. Dabei ist zu beachten, dass im Anpassungsvorschlag die Unfalltypen 3 und 6 zusammengefasst sind und die Ausmaßverteilungen anhand der aktualisierten Unfallauswertungen neu verteilt wurden.

Verzweigung im Ereignisbaum	Beschreibung			
[1] Unfalltyp	Basierend auf Heft B66 bzw. dem Adaptierungsvorschlag wird für die jeweiligen Referenztunnel von folgenden Verteilungen nach Unfalltypen ausgegangen:			
		Referenztunnel gemäß Heft B66	Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag	
	Unfalltyp 1	12,8 %	12,2 %	
	Unfalltyp 3	0,0 %	56,1 %	
	Unfalltyp 6	78,5 %		
	Unfalltyp 7	8,7 %	31,7 %	
	Summe	100 %	100 %	
[2] Ausmaßverteilung	Es wird von folgender Schadensausmaßverteilung nach Unfalltypen ausgegangen, die aus den Unfall-erhebungen abgeleitet sind:			
		Heft B66	Neu	Ausmaßklasse
		99,25 %	99,00 %	Keine Todesopfer
		0,59 %	0,95 %	1 Todesopfer
		0,15 %	0,04 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	0,00001 %	> 30 Todesopfer
	Unfalltyp 3	99,50 %	99,85 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	0,11 %	1 Todesopfer
		0,07 %	0,03 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	0,00001 %	> 30 Todesopfer
	Unfalltyp 6	99,00 %	99,85 %	Keine Todesopfer
		0,72 %	0,11 %	1 Todesopfer
		0,27 %	0,03 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	0,00001 %	> 30 Todesopfer
	Unfalltyp 7	99,50 %	99,82 %	Keine Todesopfer
		0,42 %	0,13 %	1 Todesopfer
		0,07 %	0,04 %	2-3 Todesopfer
		0,01 %	0,01 %	4-9 Todesopfer
		0,0001 %	0,0001 %	10-30 Todesopfer
		0,00001 %	0,00001 %	>30 Todesopfer

Tab. 29: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision

8.2.2.2 Verzweigungswahrscheinlichkeiten Pi infolge Brand

Verzweigung im Ereignisbaum		Beschreibung												
[1]	5 MW/30 MW/100 MW	In Heft B66 werden unveränderliche Wahrscheinlichkeiten für die Brandlasten vorgegeben. In der Fortschreibung wird eine Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil vorgeschlagen. Abhängig vom gewählten SV-Anteil wird angenommen, dass 85 % der Brände infolge Kollision Pkw zugeordnet werden können. Für den verbliebenen Anteil werden 30 und 100 MW-Brände mit einer Verteilung von 94 % zu 6 % berücksichtigt, die sich aus dem Grundwert von Gefahrguttransporten ableitet. Damit gelten folgende Werte:												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Brandlast</th> <th>Heft B66</th> <th>Adaptierungsvorschlag</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5 MW</td> <td>90 %</td> <td>85%</td> </tr> <tr> <td>30 MW</td> <td>9,9 %</td> <td>14,1%</td> </tr> <tr> <td>100 MW</td> <td>0,1 %</td> <td>0,9 %</td> </tr> </tbody> </table>	Brandlast	Heft B66	Adaptierungsvorschlag	5 MW	90 %	85%	30 MW	9,9 %	14,1%	100 MW	0,1 %	0,9 %
		Brandlast	Heft B66	Adaptierungsvorschlag										
		5 MW	90 %	85%										
		30 MW	9,9 %	14,1%										
100 MW	0,1 %	0,9 %												
Die gleiche Verteilung gilt jeweils für die Selbstzündung infolge eines technischen Defekts.														
[2]	Brandverlauf	In Heft B66 ist unabhängig von der Brandentstehung ein (schneller) Brandverlauf vorgesehen. Im Adaptierungsvorschlag werden sowohl schnelle als auch verzögerte Brandverläufe berücksichtigt. Bränden infolge Unfall wird generell ein schneller Brandverlauf zugesprochen. Brände, die sich infolge eines technischen Defektes ergeben, haben in 90 % der Fälle einen verzögerten Verlauf.												
[3]	Brandort	Im vorliegenden Fall wird ein Brandort in Tunnelmitte am Notausgang gewählt.												
[4]	Verkehrsaufkommen je 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 üblicherweise Zeiten mit hohem und mit schwachem Verkehrsaufkommen (Tages- bzw. Nachtbelastung) differenziert betrachtet. In Heft B66 wird eine rein zeitliche Verteilung vorgenommen. Im Adaptierungsvorschlag wird eine verkehrsabhängige Verteilung vorgeschlagen. Die Grundwerte können beispielsweise aus RLS-19 abgeleitet werden, sofern keine detaillierten Zahlen vorliegen.												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Zeitbereich</th> <th colspan="2">Verteilung Verkehrsaufkommen</th> </tr> <tr> <th>Heft B66</th> <th>Fortschreibung B66</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tag (6 – 22 Uhr)</td> <td>66,67 %</td> <td>Verkehrsabhängig, hier 89 %</td> </tr> <tr> <td>Nacht (22 – 6 Uhr)</td> <td>33,33 %</td> <td>Verkehrsabhängig, hier 11%</td> </tr> </tbody> </table>	Zeitbereich	Verteilung Verkehrsaufkommen		Heft B66	Fortschreibung B66	Tag (6 – 22 Uhr)	66,67 %	Verkehrsabhängig, hier 89 %	Nacht (22 – 6 Uhr)	33,33 %	Verkehrsabhängig, hier 11%	
		Zeitbereich		Verteilung Verkehrsaufkommen										
			Heft B66	Fortschreibung B66										
Tag (6 – 22 Uhr)	66,67 %	Verkehrsabhängig, hier 89 %												
Nacht (22 – 6 Uhr)	33,33 %	Verkehrsabhängig, hier 11%												
[5]	Verkehrszustand Fließender Verkehr/ Vollstau	Die Anzahl der potenziell betroffenen Tunnelnutzer ist direkt abhängig vom vorherrschenden Verkehrszustand. Es wird daher zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und Vollstau unterschieden. Für neu geplante Tunnel ist von den Werten gemäß EABT-80/100 auszugehen, was 50 Stautunden pro Jahr entspricht. In Heft B66 finden die Werte aus den RABT 2006 Berücksichtigung, die von 30 Stautunden pro Jahr ausgehen. Für Bestandstunnel sind die tatsächlichen oder zu erwartenden Anteile zu berücksichtigen.												
[6]	Detektion Ja/Nein	Im Sinne einer konservativen Annahme wird davon ausgegangen, dass bei einem Fahrzeugbrand eine Detektion nicht zu 100 % erfolgt. Für den Referenzstunnel gemäß Heft B66 wird davon ausgegangen, dass in 1 % der Fälle ein Brand nicht erkannt wird. Für den Referenzstunnel gemäß Adaptionsvorschlag wird dieser Wert auf 5 % erhöht. Die Werte sind dabei als Näherung zu verstehen. Genauere Werte bedürfen individueller Betrachtungen mittels Fehlerbaumanalysen, in denen Eingangswerte entweder über den Ausfall von Anlagenkomponenten auf Basis entsprechender Statistiken erfasst werden müssen oder anhand von Störungs- und Wartungsberichten abzuleiten sind. Erfahrungen aus Bestandstunneln zeigen aber, dass die bisher angesetzte Versagenswahrscheinlichkeit mit 1 % die tatsächlichen Verhältnisse eher unterschätzt. Der Endzustand einer Systemabfrage mit den Verzweigungen „(Gesamt-)System funktioniert/funktioniert nicht“ setzt sich selbst aus mehreren Einzelkomponenten zusammen, die individuell ermittelt werden müssen.												
[7]	Tunnelsperrung Ja/Nein	Von einem Brand im Tunnel können auch technische Einrichtungen im Tunnel betroffen sein. Dies (oder andere technische Probleme) führen unter Umständen dazu, dass die Sperreinrichtungen nicht ordnungsgemäß funktionieren und somit eine Tunnelschließung nicht erfolgen kann. Für den Referenzstunnel gemäß Heft B66 ist dieser Fall mit 1 % der Fälle angenommen. Für den Referenzstunnel gemäß Adaptionsvorschlag wird dieser Wert auf 5 % erhöht (siehe oben).												
[8]	Lüftungssystem Ja/Nein	Die Belüftung erfolgt über Strahlventilatoren. Nach erfolgter Detektion wird mithilfe entsprechender Steuerungsprogramme die Ausbreitung der Rauchgase bzw. des Brandes beeinflusst. Es wird für den Referenzstunnel die Annahme getroffen, dass in einem von hundert Fällen (1 %) das entsprechende Lüftungsprogramm nicht aktiviert wird. Für den Referenzstunnel gemäß Adaptionsvorschlag wird dieser Wert auf 5 % erhöht (siehe oben).												
[9]	Erhöhtes Ausmaß Ja/Nein	Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, in das Ereignis involviert sind. Da der Eintritt dieses Ereignisses stets zu einer Vergrößerung des Schadensausmaßes führen kann, ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen. In Heft B66 ist diese Verzweigung nicht berücksichtigt. In den Berechnungen gemäß Adaptionsvorschlag wird sie aus Vergleichbarkeitsgründen auch vernachlässigt, ist aber ansonsten umzusetzen.												

Tab. 30: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes

8.3 Schadensausmaßermittlung

Während Schadensausmaße für die häufigeren Ereignisse mit eher geringen Unfallfolgen über entsprechende Unfallstatistiken bestimmt werden können, erfordern seltenere Ereignisse mit tendenziell höheren Schadensausmaßen aufgrund fehlender Datengrundlagen Modelle zur Bestimmung von Ein- und Auswirkungen auf Bauwerk und Nutzer.

8.3.1 Schadensausmaße infolge Kollision

Das zu erwartende Ausmaß infolge einer Kollision wird auf Grundlage des in Heft B66 vorgegebenen Zusammenhangs gemäß Tabelle 31 bestimmt. Sie wird auch im Adaptierungsansatz in dieser Form verwendet.

8.3.2 Schadensausmaße infolge Brand

Auf ihrer Flucht werden Tunnelnutzer im Wesentlichen durch Rauch, bestehend aus den Rußpartikeln und Rauchgasen, behindert. Rußpartikel führen zu einer Reduzierung der Sicht und Orientierung und bewirken starke Irritationen der Atemwege und Schleimhäute. Mit zunehmender Expositionsdauer kommen noch Einflüsse durch die Toxizität der Rauchgase und der Temperatureinwirkung hinzu.

Für die Berechnungen der Schadensausmaße des Referenztunnels gemäß Heft B66 kommt ein mikroskopischer Modellansatz zum Einsatz. Zur Abschätzung der jeweiligen Schadensausmaße wird dabei der Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit verwendet. Durch Überlagerung dieses Zusammenhangs mit den numerisch berechneten Sichtweiten lassen sich in Abhängigkeit der Fluchtgeschwindigkeit und des Notausgangsabstands Selbstrettungsbereiche ableiten. Über die Verknüpfung mit den Personendichten aus dem Verkehrsmodell lassen sich anschließend für die einzelnen Bereiche die jeweiligen Betroffenenzahlen bestimmen. Hinsichtlich der Personendichten wird für den Adaptierungsvorschlag angenommen, dass Fahrzeuge unterschiedlich mit Personen besetzt sind. Statistische Auswertungen zeigen, dass Pkw durchschnittlich von 1,5 Personen besetzt sind. Für Lkw wird ein Fahrzeugbelegungsgrad von 1,0 berücksichtigt. Busse sind mit einer Besetzung von 40 Personen einzurechnen. Typischerweise beträgt der Anteil der Busse etwa 5 % am SV-Aufkommen.

Schadensausmaßklasse	Erwartetes Ausmaß
Keine Todesopfer	0 Todesopfer
1 Todesopfer	1 Todesopfer
2-3 Todesopfer	2 Todesopfer
4-9 Todesopfer	5 Todesopfer
10-30 Todesopfer	15 Todesopfer
> 30 Todesopfer	35 Todesopfer

Tab. 31: Schadensausmaße infolge Kollision

Für die Berechnungen des Modelltunnels als Adaptionsvorschlag wird ein mikroskopischer Modellansatz gewählt, der die Bewegungen von einzelnen Personen abbildet und so zu individuelleren Ergebnissen führt. Im verwendeten FED-Modell wird neben den Wirkungen von toxischen Brandgasen zusätzlich auch die Wärmeeinwirkungen berücksichtigt sind. Die Sichtverhältnisse haben dabei Einfluss auf die Fluchtgeschwindigkeit von Personen.

8.4 Risikoermittlung

Die Quantifizierung von Risiken erfordert die Kenntnis über die Häufigkeit, mit der bestimmte Schadensereignisse eintreten. Als Maß für das Risiko dient dann die Verknüpfung von Schadensausmaß mit der zugehörigen Eintrittshäufigkeit, sowie einem auswirkungsabhängigen Aversionsfaktor. Das Risiko ist wie folgt definiert:

$$\text{Risiko} = \text{Häufigkeit des Eintritts} * \text{Größe der Auswirkungen} * \text{Aversionsfaktor}$$

Als Aversionsfaktor φ wird der im Forschungsbericht „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ verwendete Aversionsfaktor übernommen. Hierbei wird für Personenschäden (Todesopfer) folgende Formel verwendet:

$$\varphi = \sqrt{\text{Schadensausmaß}}$$

Der Aversionsfaktor trägt dem Wunsch Rechnung, seltenere Ereignisse mit größeren Ausmaßen stärker zu gewichten als häufigere Ereignisse mit geringeren Auswirkungen, da sie von der Öffentlichkeit als schwerwiegender empfunden werden.

Der so bestimmte Schadenerwartungswert wird auch als bewertetes kollektives Risiko bezeichnet.

8.5 Risikobewertung

8.5.1 Vergleich Referenztunnel nach Heft B 66 – Adaptierungsvorschlag ohne Fremdrettungseinfluss

Die Auswirkungen der Adaptierungsvorschläge auf das Sicherheitsniveau des Referenztunnels gemäß Adaptierungsvorschlag im Vergleich zum Referenz-tunnel gemäß Heft B66 werden nachfolgend quanti-fiziert und bewertet. Dabei werden die Initialereig-nisse Unfall und Brand zunächst getrennt betrach-tet.

In Bild 23 ist zu erkennen, dass die ursprüngliche Grundcharakteristik beim Adaptierungsvorschlag weiterhin vorhanden ist. Aufgrund der deutlich ge-ringeren Unfalleintrittshäufigkeit liegt die Kurve des Adaptierungsvorschlages allerdings auf einem tie-feren Niveau. Zusätzlich sind im Bereich von 1 bis 2 Betroffenen auf Grundlage der neuen Unfallere-hbungen deutliche Reduktionen vorhanden.

Für die Schadensausmaßdiagramme der Brandrisi-ken ist in Bild 24 erkennbar, dass sich hier größere Unterschiede zwischen den jeweiligen Kurven er-geben. Dies ist sowohl in den unterschiedlichen Eingangsparemtern als auch den unterschiedli-chen Fluchtbedingungen begründet. So hat z. B. die Zeitspanne zwischen Brandausbruch und Be-ginn der Flucht maßgeblichen Einfluss auf die Scha-densausmaße. Aber auch ein hoher Fahrzeugbe-legungsgrad bewirkt unter sonst gleichen Bedingun-gen erhöhte Ausmaße.

Eine vergleichende Darstellung beider Referenz-tunnel ist abschließend als Summenhäufigkeitsge-rade der Gesamtrisiken dargestellt (siehe Bild 25).

Die als Häufigkeits-Ausmaß-Diagramme dargestell-ten Risiken lassen sich auch als numerische Kenn-größen darstellen. In Tabelle 32 sind dazu die Punktrisikowerte als Schadenerwartungswerte so-wie bewertete Risiken der beiden Untersuchungs-varianten gegenübergestellt. Tabelle 33 stellt ab-schließend den relativen Vergleich zueinander dar.

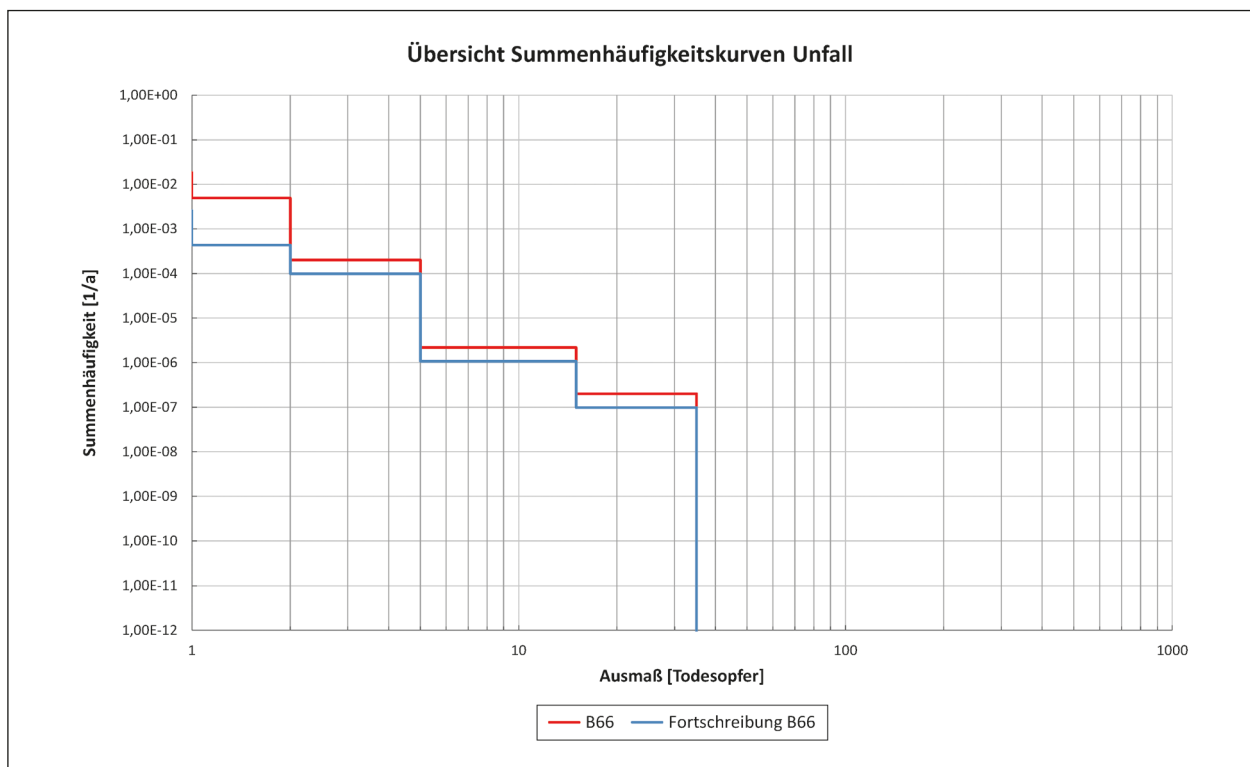


Bild 23: HA-Diagramm der Unfallrisiken

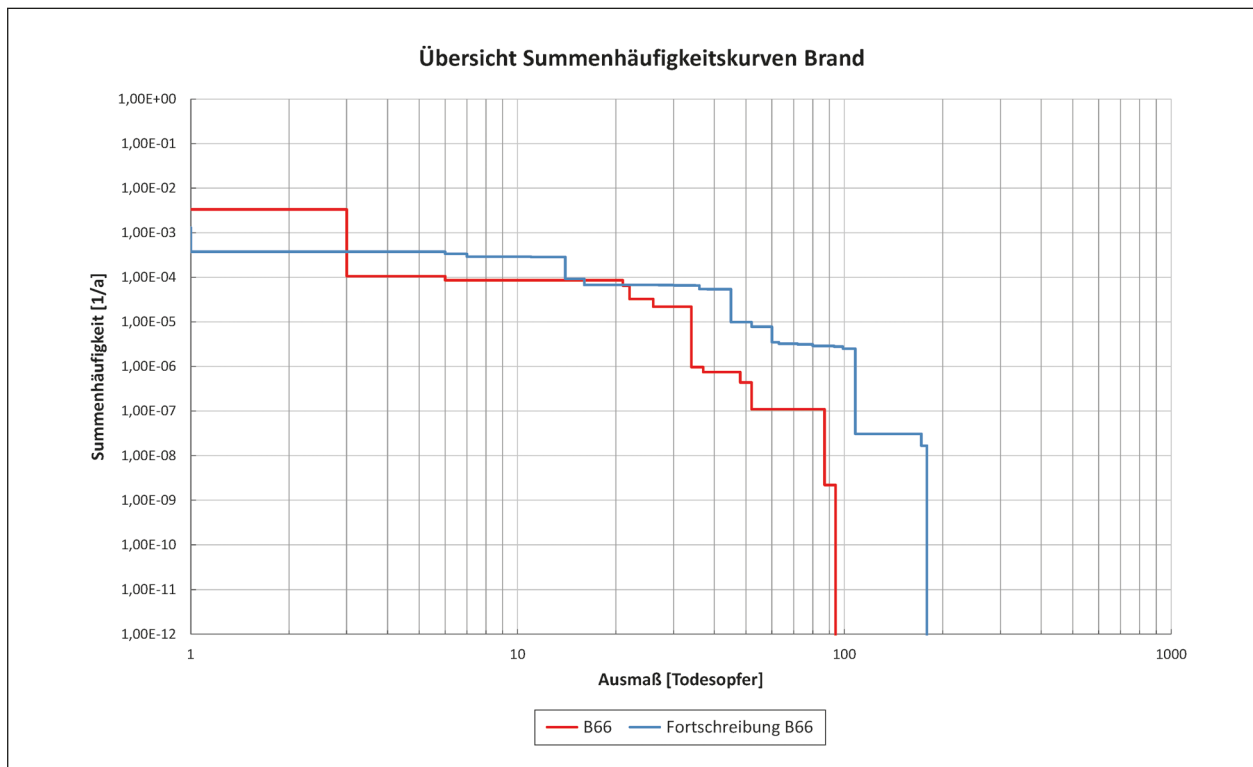


Bild 24: HA-Diagramm der Brandrisiken

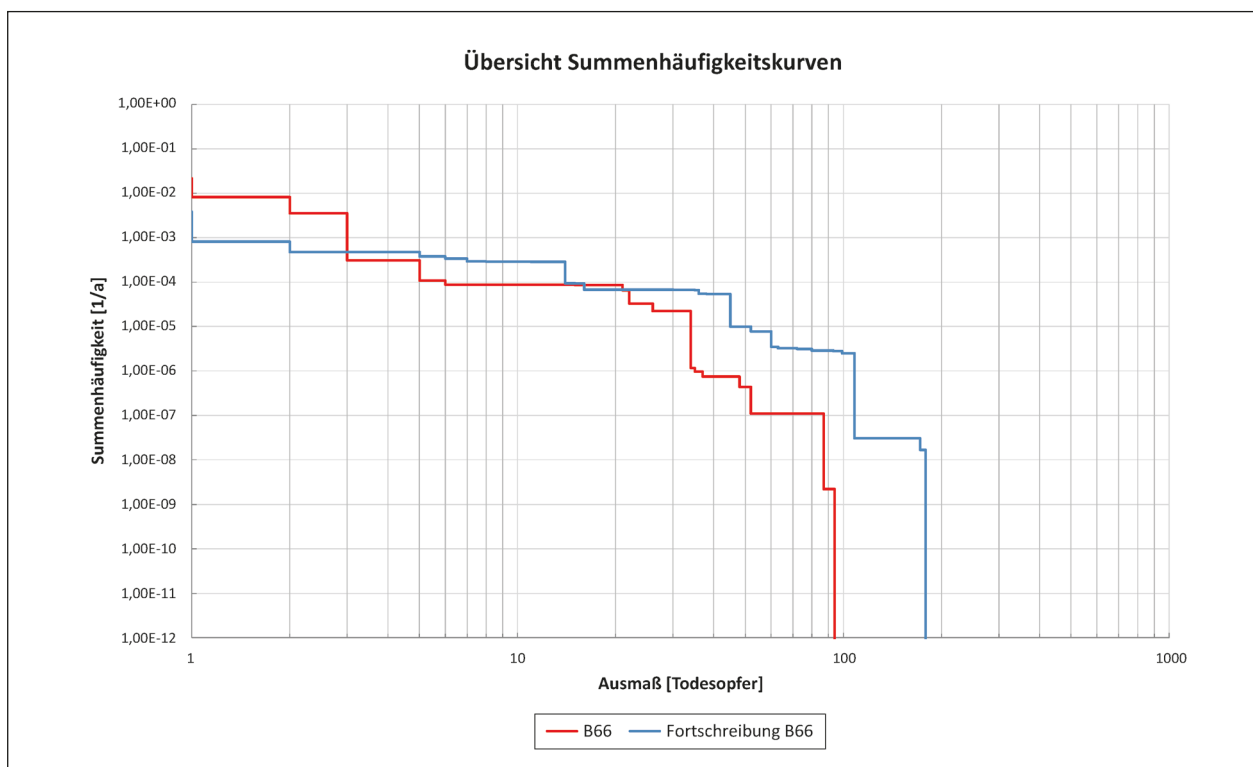


Bild 25: HA-Diagramm der Gesamtrisiken

	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]			Bewertetes kollektives Risiko [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt	Unfall	Brand	Gesamt
Referenztunnel gemäß B66	0,0240	0,0120	0,0360	0,0293	0,0283	0,0577
Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag	0,0033	0,0074	0,0108	0,0043	0,0346	0,0389

Tab. 32: Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten

	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]			Bewertetes kollektives Risiko [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt	Unfall	Brand	Gesamt
Referenztunnel gemäß B66	-	-	-	-	-	-
Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag	-86 %	-38 %	-70 %	-85 %	22 %	-33 %

Tab. 33: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Heft B66)

8.5.2 Vergleich Referenztunnel nach Heft B66 – Adaptierungsvorschlag mit Fremdrettungseinfluss

Der Fremdrettungseinfluss wird auf die Brandereignisse beschränkt. Hierbei wird beispielhaft davon ausgegangen, dass der Tunnel gemäß Adaptierungsvorschlag über eine Portalfeuerwehr verfügt, die innerhalb von 5 Minuten nach Alarmierung am Ereignisort ist und mit den Löschmaßnahmen beginnt. Zur Berücksichtigung der Personenrettung wird eine Ausmaßminderung entsprechend nachfolgender Tabelle 34 in Abhängigkeit von der Eintreffzeit und Eintreffwahrscheinlichkeit vorgenommen.

Für die Brandrisiken bewirkt der angenommene Fremdrettungseinfluss deutliche Sicherheitsgewinne. Die Ergebnisse der Risikoermittlungen sind in Bild 26 in Form von Summenhäufigkeitslinien vergleichend gegenübergestellt. In Bild 27 sind Summenhäufigkeitslinien für die Gesamtrisiken in entsprechender Weise dargestellt.

Auch für den Fremdrettungseinfluss lassen sich neben den grafischen Auswertungen zusätzlich numerische Kenngrößen darstellen. In Tabelle 35 sind dazu die Punktrisikowerte als Schadenerwartungswerte sowie die bewerteten Risiken der beiden Untersuchungsvarianten mit und ohne Fremdrettung gegenübergestellt. In Tabelle 36 sind die Abweichungen zum Referenztunnel im relativen Vergleich aufgeführt.

Personenrettung	Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Zur Berücksichtigung der Fremdrettung wird für in Abhängigkeit von der Eintreffzeit eine Ausmaßminderung vorgenommen. In Heft B66 ist keine entsprechende Ausmaßminderung vorgesehen		
	Eintreffzeit [min]	Eintreffwahrscheinlichkeit [%]	Ausmaßminderung [%]
	< 5	80	20
< 10	20	15	
< 15	0	10	
< 20	0	5	
≥ 20	100	0	

Tab. 34: Verzweigung Personenrettung im Ereignisablauf infolge eines Brandes

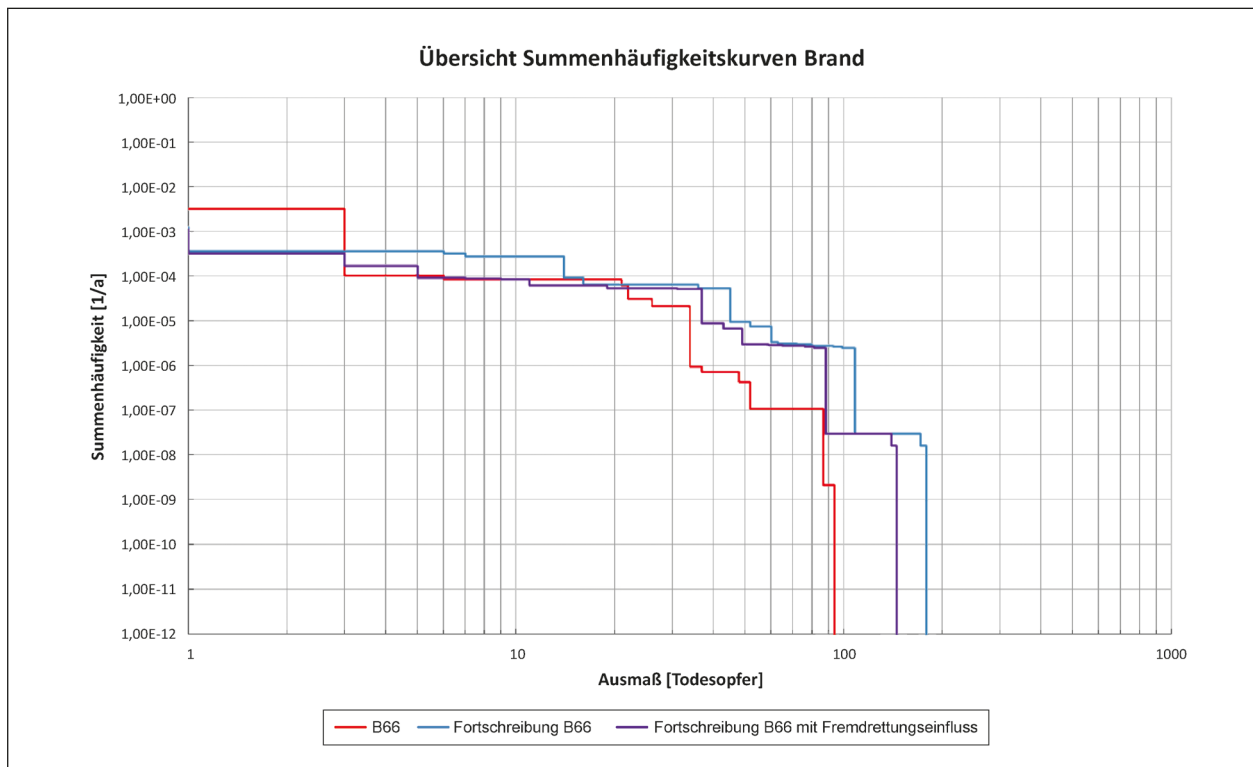


Bild 26: HA-Diagramm der Brandrisiken mit und ohne Fremddrettungseinfluss

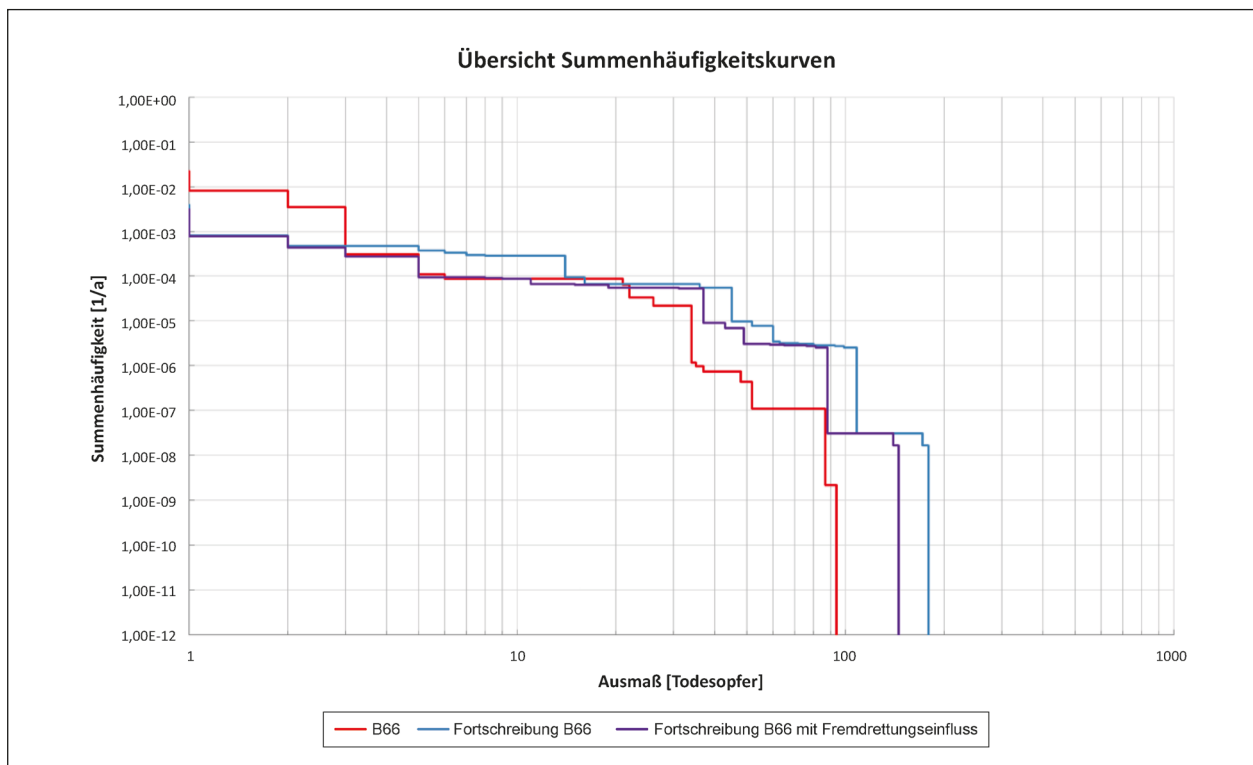


Bild 27: HA-Diagramm der Gesamtrisiken

	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]			Bewertetes kollektives Risiko [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt	Unfall	Brand	Gesamt
Referenztunnel gemäß B66	0,0240	0,0120	0,0360	0,0293	0,0283	0,0577
Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag	0,0033	0,0074	0,0108	0,0043	0,0346	0,0389
Referenztunnel mit Fremddrettungseinfluss	0,0033	0,0041	0,0074	0,0043	0,0173	0,0215

Tab. 35: Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten

	Schadenerwartungswerte [Getötete/Jahr]			Bewertetes kollektives Risiko [Getötete/Jahr]		
	Unfall	Brand	Gesamt	Unfall	Brand	Gesamt
Referenztunnel gemäß B66	-	-	-	-	-	-
Referenztunnel gemäß Adaptierungsvorschlag	-86 %	-38 %	-70 %	-85 %	22 %	-33 %
Referenztunnel mit Fremddrettungseinfluss	-86 %	-66 %	-79 %	-85 %	-39 %	-63 %

Tab. 36: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Heft B66)

9 Zusammenfassender Vorschlag für die Fortschreibung der Bewertungsmethodik

Die folgende Zusammenfassung fasst den Vorschlag zur Fortschreibung der Bewertungsmethodik gemäß Heft B66 zusammen. Dabei werden einerseits Empfehlungen auf Modellebene und andererseits auf Verfahrensebene aufgezeigt.

9.1 Weiterentwicklung auf Modellebene

Mit dem aktuellen Forschungsprojekt FE 15.0663/2019/ERB „Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Straßentunnel“ wurden verschiedene Weiterentwicklungsempfehlungen ausgearbeitet, die aufgrund der Erfahrungen aus der praktischen Anwendung der Methodik nach Heft B66 [5] wie auch der übergeordneten Entwicklungen im Bereich von Risikoanalysen für Straßentunnel resultierten. Die vorgeschlagenen Empfehlungen sind nachfolgend entsprechend der Struktur von Heft B66 zusammengefasst.

9.1.1 Maßgebliche Szenarien

Die Analyse und Bewertung der Risiken erfolgt für gesondert für die beiden Gefahrentypen

- Kollision (ohne Brand) und
- Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR.

Für die Brandszenarien wird empfohlen, künftig die drei Brandlasten 5 MW, 30 MW und 100 MW zu berücksichtigen.

9.1.2 Initialereignishäufigkeiten

Als Basiswerte dienen Unfallraten für die am häufigsten anzutreffenden Tunnelkonfigurationen. Dies sind Tunnel mit einer Länge von ≤ 600 m und 1 Fahrstreifen pro Fahrtrichtung im Fall von Gegenverkehrstunnel und 2 Fahrstreifen im Fall von Richtungsverkehrstunnel. Folgende Einflüsse werden hierbei über Korrekturfaktoren berücksichtigt:

- Zu-/Abfahrten
- Tunnellänge
- Fahrstreifenanzahl
- Fahrstreifenbreite
- Seitenstreifen
- Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen
- zulässige Geschwindigkeit
- Differenzgeschwindigkeit

Die Unfallhäufigkeit H_U bestimmt sich in Abhängigkeit der Basis-Unfallrate, dem durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen, der Tunnellänge sowie der Einflussfaktoren wie folgt:

$$H_U = \frac{UR \cdot DTV \cdot L \cdot 365}{10^6} \cdot f_{ZA} \cdot f_L \cdot f_{FS} \cdot f_{FSB} \cdot f_{SS} \cdot f_{DTV/FS} \cdot f_v \cdot f_{\Delta v}$$

UR Basis-Unfallrate [Unfälle pro 10⁶ Fzg-km]

DTV Durchschnittliches, tägliches Verkehrsaufkommen [Kfz/24 h]

L Tunnellänge [km]

fx Einflussfaktoren [-]

f_{ZA} Vorhandensein von Zu-/Abfahrten

f_L Tunnellänge

f_{FS} Fahrstreifenanzahl

f_{FSB} Fahrstreifenbreite

f_{SS} Seitenstreifen

$f_{DTV/FS}$ Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen

f_v zulässige Geschwindigkeit

$f_{\Delta v}$ Differenzgeschwindigkeit

Basis-Unfallraten (für Tunnel ohne Zu-/Abfahrten)

Die Basis-Unfallraten UR je Tunneltyp sind in Tabelle 37 aufgeführt.

Unfallrate [Unfälle pro 10 ⁶ Fzg-km]	
RV-Tunnel	GV-Tunnel
UR _{RV}	UR _{GV}
0,16	0,10

Tab. 37: Basis-Unfallraten

Zu-/Abfahrt vorhanden	Zu-/Abfahrtfaktor f_{ZA}	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{F/A,RV}$	$f_{Z/A,GV}$
nein	1,00	1,00
ja	1,60	2,00

Tab. 38: Zu-/Abfahrtfaktor f_{ZA}

Tunnellänge	Längenfaktor f_L	
	Tunnel ohne Zu-/Abfahrt	Tunnel mit Zu-/Abfahrt
	$f_{L,ohneZ/A}$	$f_{L,ohneZ/A}$
0 – 600 m	1,00	1,00
601 – 1.200 m	0,70	0,90
1.201 – 1.800 m	0,40	0,80
1.801 – 3.000 m	0,35	0,78
> 3.000 m	0,30	0,76

Tab. 39: Längenfaktor f_L

Einflussfaktor Zu-/Abfahrt (f_{ZA})

In Tabelle 38 sind die ermittelten Faktoren zur Berücksichtigung des Einflusses von Zu- und Abfahrten in Tunneln zusammengefasst.

Einflussfaktor Tunnellänge (f_L)

Eine Zusammenstellung der Faktoren zur Berücksichtigung des Längeneinflusses enthält Tabelle 39.

Einflussfaktor Fahrstreifenanzahl (f_{FS})

Die Faktoren zur Berücksichtigung der Fahrstreifenanzahl kann Tabelle 40 entnommen werden.

Anzahl Fahrstreifen je Fahrtrichtung	Fahrstreifenfaktor f_{FS}	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{FS,RV}$	$f_{FS,GV}$
1	0,70	1,00
2	1,00	1,50
3	1,30	-
4	1,50	-

Tab. 40: Fahrstreifenfaktor f_{FS}

Einflussfaktor Fahrstreifenbreite (f_{FSB})

Der Einfluss der Fahrstreifenbreite lässt auf Basis der in Tabelle 41 angegebenen Faktoren berücksichtigen. Den Bezug bildet hierbei eine Regelbreite von $\geq 3,50$ m.

Fahrstreifenbreite	Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB}
3,0 m < FS-Breite < 3,25 m	1,2
3,25 m < FS-Breite < 3,50 m	1,17
FS-Breite $\geq 3,50$ m	1,0

Tab. 41: Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB} (Quelle: BASt Heft V226)

Einflussfaktor Seitenstreifen (f_{SS})

Der Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses eines Seitenstreifens auf die Unfallhäufigkeit findet sich in Tabelle 42.

Präsenz Seitenstreifen	Seitenstreifenfaktor f_{SS}
Kein Seitenstreifen	1,00
Mit Seitenstreifen	0,83

Tab. 42: Seitenstreifenfaktor f_{SS}

DTV pro Fahrstreifen	Faktor DTV/Fahrstreifen	
	RV-Tunnel	GV-Tunnel
	$f_{DTV/FS,RV}$	$f_{DTV/FS,GV}$
0 – 6.000	0,95	1,00
6.001 – 12.000	1,00	1,05
12.001 – 18.000	1,50	1,55
> 18.000	2,00	-

Tab. 43: Verkehrsaufkommensfaktor

Zulässige Geschwindigkeit	Geschwindigkeitsfaktor f_v
40 km/h	0,50
50 km/h	0,63
60 km/h	0,75
70 km/h	0,88
80 km/h	1,00
100 km/h	1,25
120 km/h	1,50
130 km/h	1,63

Tab. 44: Geschwindigkeitsfaktor f_v

Differenzgeschwindigkeit	Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$	
	Steigung	Gefälle
$0 \leq \Delta v < 5$ km/h	1,00	1,00
$5 \leq \Delta v < 10$ km/h	1,02	1,01
$10 \leq \Delta v < 15$ km/h	1,05	1,03
$15 \leq \Delta v < 20$ km/h	1,10	1,05
$\Delta v \geq 20$ km/h	1,20	1,10

Tab. 45: Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$

Einflussfaktor Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen ($f_{DTV/FS}$)

In Tabelle 43 sind die Faktoren in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens pro Fahrstreifen zusammengefasst.

Einflussfaktor zulässige Geschwindigkeit (f_v)

Die Faktoren zur Berücksichtigung der zulässigen Geschwindigkeit kann Tabelle 44 entnommen werden.

Einflussfaktor Differenzgeschwindigkeit ($f_{\Delta v}$)

Die Zusammenstellung der Faktoren zur Berücksichtigung der Differenzgeschwindigkeit enthält Tabelle 45 in Abhängigkeit von Differenzgeschwindigkeitsklassen getrennt für Steigungs- und Gefällestrrecken.

- Ermittlung der Differenzgeschwindigkeiten Δv

Die Differenzgeschwindigkeiten Δv ergeben sich wie in nachfolgender Gleichung dargestellt aus der Differenz der Fahrgeschwindigkeiten von Pkw und Lkw:

$$\Delta v = v_{F,Pkw} - v_{F,Lkw}$$

Ermittlung der Fahrgeschwindigkeiten v_F

- Pkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,Pkw}$

Der Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit von Pkw wird die Annahme zugrunde gelegt, dass durch die Fahrzeugführer unabhängig von der Längsneigung eine Geschwindigkeit von 10 % über der zulässigen Geschwindigkeit gewählt wird. Die Pkw-Fahrgeschwindigkeit bestimmt sich somit wie folgt:

$$v_{F,Pkw} = 1,1 \cdot v_{zul}$$

- Lkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,Lkw}$

Die Fahrgeschwindigkeit von Lkw variiert in Abhängigkeit von der Längsneigung und der zulässigen Geschwindigkeit. Gemäß den RABT bzw. EABT 80/100 ergeben sich die in Tabelle 46 aufgeführten Fahrgeschwindigkeiten für Lkw.

Zul. Geschwindigkeit	Lkw-Fahrgeschwindigkeiten $v_{F,LKW}$ [km/h] in Abhängigkeit der Längsneigung												
	Gefälle [%]						0	Steigung [%]					
	- 6	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1		1	2	3	4	5	6
$V_{zul} \geq 80$ km/h	86	86	86	86	86	86	86	86	85	80	74	69	63
$V_{zul} = 70$ km/h	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	74	69	63
$V_{zul} = 60$ km/h	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	63
$V_{zul} = 50$ km/h	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55

Tab. 46: Lkw-Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Längsneigung

9.1.3 Ereignisablauf/Struktur Ereignisbaum

9.1.3.1 Kollision (ohne Brand)

Es werden keine Anpassungen zur Struktur der Ereignisbaumanalyse vorgeschlagen.

9.1.3.2 Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR

Im Ereignisablauf sind zur Abbildung von Brandereignissen folgende Verzweigungen in der Ereignisbaumanalyse vorgesehen:

- Ereignisort (z. B. Einfahrtsbereich/Tunnelinnenstrecke/Tunnelmitte...)
- Verkehrsaufkommen (Tag/Nacht/...)
- Verkehrszustand (freier Verkehr/Stau)
- Brandlast (5/30/100 MW)
- Brandentwicklung (schnell/verzögert)
- Detektion erfolgreich (ja/nein)
- Alarmierung Tunnelnutzer erfolgreich (ja/nein)
- Tunnelsperreinrichtung aktiviert (ja/nein)
- Lüftungssystem aktiviert (ja/nein)
- Weitere Sicherheitssysteme vorhanden und aktiviert (ja/nein)
- Erhöhtes Ausmaß (ja/nein)
- Beginn der Fremdrettungsmaßnahmen

Für die einzelnen Verzweigungswahrscheinlichkeiten werden folgende Anpassungen vorgeschlagen bzw. Hinweise angemerkt:

- Ereignisort: Durch die Lage des Ereignisortes können sich aufgrund geometrischer und verkehrlicher Randbedingungen sowie infolge be-

triebstechnischer Einrichtungen unterschiedliche Schadensausmaße ergeben. Ggf. ist es notwendig, mehrere Brandorte abzubilden. Dies gilt beispielsweise bei Unterwassertunneln mit unterschiedlichen Gradientenverläufen (Gefälle, Tiefpunkt, Steigung). Bei konstanten Längsneigungen ist häufig ein Brandort in Tunnelmitte im Bereich eines Notausganges, der dann nicht mehr zur Flucht zur Verfügung steht, zielführend.

- Brandlast: In Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie ergeben sich unterschiedliche Brandszenarien. In aller Regel werden Brände mit einer Brandleistung von 5, 30 bzw. 100 MW zugrunde gelegt. Im Adaptierungsvorschlag wird eine Verteilung in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil vorgesehen. 6 % des SV-Anteils sind demnach 100 MW-Bränden zuzuordnen, 94 % des SV-Anteils 30 MW-Bränden. Der Pkw-Anteil ist 5 MW-Bränden zuzuordnen.
- Brandentwicklung: Im Adaptierungsvorschlag werden unterschiedliche Brandverläufe berücksichtigt. Brände infolge von Unfällen sind durch einen schnellen Brandverlauf gekennzeichnet. Den Bränden aufgrund von technischen Defekten geht eine Phase von 5 Minuten voraus, in denen zunächst die Brandleistung einem Niveau von 5 MW verharrt, bevor sie auf ihre maximalen Werte ansteigt. In Heft B66 wurde nur eine Brandentwicklung berücksichtigt, die hinsichtlich der genauen Charakteristik nicht spezifiziert wurde. Der Adaptierungsvorschlag sieht dazu detaillierte Angaben vor. Hinsichtlich der Anteile wird vorgeschlagen, aus Unfällen resultierende Brände zu 100 % einem schnellen Brandverlauf zuzuordnen, aus technischen Defekten resultierende Brände nur zu 10 %, die verbleibenden 90 % entsprechen damit einem verzögerten Brandverlauf.

- **Verkehrszustand:** Erhebliche Auswirkungen auf die Ausmaßermittlung hat der vorherrschende Verkehrszustand zu Beginn eines Schadensereignisses. Prinzipiell ist hierbei zwischen den Verkehrszuständen bei freiem Verkehrsfluss und bei Vollstau zu unterscheiden. Im Fall eines Schadensereignisses bei freiem Verkehrsfluss werden die auf den Brand zufahrenden Fahrzeuge sich vor dem Brandherd aufstauen, während die sich auf der stromabwärtigen Seite befindenden Fahrzeuge frei aus dem Tunnel ausfahren können. Eine grundsätzlich andere Situation ergibt sich im Fall eines Vollstaus, z. B. infolge von Unfallereignissen in den nachfolgenden Streckenabschnitten. Der individuelle Stauanteil von Bestandstunneln kann stark variieren. Für neu geplante Tunnel im Richtungsverkehr mit in der Regel frei abfließendem Verkehr hinter dem Brandort bzw. Verkehrsqualität D oder besser nach HBS wird im Adaptierungsvorschlag ein Stauanteil von 50 h/Jahr und Röhre berücksichtigt, der sich aus den EABT-80/100 ableitet.
- **Verkehrsaufkommen:** In Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens variiert die Anzahl an potenziell betroffenen Personen während eines Brandereignisses. Zur Berücksichtigung von unterschiedlichem Verkehrsaufkommen wird zwischen Situationen bei Tag (hohe Verkehrsbelastung) und Nacht (geringere Verkehrsbelastung) unterschieden. Ggf. ist auch die Spitzenstunde abzubilden. Verkehrserhebungen zeigen, dass der Tagverkehr (06.00-22.00 Uhr) einen deutlich höheren Anteil am Verkehrsaufkommen wie der Nachtverkehr (22.00-6.00 Uhr) aufweist. Sofern keine detaillierten Werte vorliegen, können Grundwerte, z. B. aus den RLS-19 [31] abgeleitet werden. Demnach tritt in den Tagstunden ca. 89 % des Gesamtverkehrsaufkommens auf.
- **Detektion und Alarmierung:** Das Erkennen und Melden eines Ereignisses (Detektion) mit einer anschließenden Alarmierung der Tunnelnutzer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Selbstrettungsmöglichkeiten und damit auch auf das zu erwartende Schadensausmaß. Daher ist eine Unterscheidung nach einer erfolgreichen Detektion bzw. keiner Detektion relevant. Im Adaptierungsvorschlag werden Sensoren zur Branderkennung direkt modelliert und ermöglichen damit abhängig von der Brandentwicklung und der Strömungsverhältnisse eine individuellere Detektionszeit, die aber die maximalen Detektionszeiten gemäß den EABT-80/100 nicht überschreiten darf. Zur Berücksichtigung eines Systemausfalls wird die Annahme getroffen, dass die automatische Detektion nur in 95 % der Fälle erfolgt. Die Schadensausmaßberechnungen gemäß Heft B66 erfolgen meist, sofern nicht spezielle Fragestellungen relevant werden, über einen makroskopischen Modellansatz, bei dem sich mit der Alarmierung Personen mit einer mittleren Gehgeschwindigkeit zur Flucht begeben. Im Rahmen des Adaptierungsvorschlages soll hier eine stärkere Individualisierung erfolgen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass zwischen Detektion und tatsächlichem Beginn der Flucht eine Zeitspanne von 90 s vergeht. Demnach gelten für Personen, die wach sind und über ein automatisches Alarmierungssystem informiert werden, aber mit der Umgebung nicht vertraut sind, Reaktionszeiten zwischen 30 s und 2,5 min. Findet keine direkte Alarmierung über automatische Systeme statt, so wird eine verzögerte Fluchtreaktion von 3 min angenommen, die z. B. durch Wahrnehmung von Brand oder Rauch (Gefährdungserkennung) oder entgegenkommende Personen (Lemming-Effekt) ausgelöst wird. Zusätzlich stehen auch manuelle Brandmeldeeinrichtungen (Notruf, Betätigung Handfeuermelder) zur Verfügung, über die Tunnelnutzer einen Brand (verzögert) melden können. Versuche zeigen, dass sich nicht alle Menschen tatsächlich zur Flucht begeben (können). Deren Anteil wird mit ca. 10 % aller Tunnelnutzer abgeschätzt. Das Versagen von automatischer Detektion und Alarmierung wird im Adaptierungsvorschlag mit 5 % angenommen.
- **Sperreinrichtung:** Durch eine Sperreinrichtung kann verhindert werden, dass nach der Detektion eines Schadensereignisses noch weitere Fahrzeuge in den Tunnel einfahren und somit zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes führen. Da technische Systeme auch Fehler aufweisen können, wird angenommen, dass in 5 % der Fälle keine Sperrung erfolgt. Die einzuhaltenen Sperrzeiten sind in den EABT-80/100 mit 30 sec nach der Detektion angegeben.
- **Lüftung:** Mithilfe von Lüftungssystemen kann im Fall von Bränden sowie in Fällen mit Kontamination das Schadensausmaß positiv beeinflusst werden. Die Lüftungsanlage stellt damit ein zentrales Element der Selbstrettung im Tunnel dar und ist im Ereignisablauf zu berücksichtigen. Auch hier werden die Ausfallanteile im Adaptie-

rungsvorschlag gegenüber dem bisherigen Verfahren von 1 % auf 5 % erhöht.

- Weitere Sicherheitssysteme: Sind in einem Tunnel zusätzliche relevante Sicherheitssysteme vorhanden, so sind auch diese in den Ereignisbaum einzubinden. Als Beispiel dafür seien Brandbekämpfungsanlagen genannt.
- Erhöhte Schadensausmaße: Ein erhöhtes Ausmaß liegt vor, wenn Fahrzeuge mit einem sehr hohen Personenbesetzungsgrad, wie er beispielsweise bei Bussen gegeben ist, mit in das Ereignis involviert sind. Da der Eintritt dieses Ereignisses stets zu einer Vergrößerung des Schadensausmaßes führen kann, ist dieses Szenario im Ereignisablauf mit zu berücksichtigen.
- Fremdrettung: Das rechtzeitige Eintreffen von Rettungskräften am Ort des Ereignisses kann zu einer Reduzierung des Schadensausmaßes beitragen. Neben der Abbildung einer direkten Löschwirkung (z. B. eines Feuerwehreinsatzes oder einer Brandbekämpfungsanlage) kann damit auch die Rettung von Personen aus dem Gefahrenbereich im Tunnel abgebildet werden. Es wird vorgeschlagen, das Element der Fremdrettung in der Adaptierung zu berücksichtigen. Im Adaptierungsvorschlag wird dazu simulativ die Löschwirkung abgebildet (Wassereinsatz im CFD-Modell). Diese direkte Beeinflussung des Brandverhaltens verbessert die Fluchtbedingungen. Die Auswirkung der Fremdrettung auf das Schadensausmaß wird auch über die Eintreffwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Eintreffzeit berücksichtigt. Hier wird angenommen, dass Einsatzkräfte z. B. bewusste Personen aus dem Gefahrenbereich retten. Insgesamt werden für den Tunnel 5 Zeitintervalle ($in \leq 5 / < 10 / < 15 / < 20 / \geq 20$ min) betrachtet. Die damit erreichbaren Ausmaßminderungen sind für jeden Tunnel individuell zu ermitteln und nachfolgend nur exemplarisch dargestellt.
- Betriebsart: Darüber hinaus hat die Anzahl der Röhren sowie die Betriebsart des Tunnels Einfluss auf die Anzahl der zu untersuchenden Szenarien. Neben einem Richtungsverkehrsbetrieb tritt z. B. für Wartungsmaßnahmen die Notwendigkeit auf, Tunnel temporär im Gegenverkehr zu betreiben. Auch für Sanierungsmaßnahmen ist ggf. ein längerfristiger Gegenverkehrsbetrieb erforderlich, bei dem sich Risikounterschiede aufgrund der Betriebsart ergeben.

9.1.4 Schadensausmaßermittlung – Kollision (ohne Brand)

Die gefahrene Geschwindigkeit im Tunnel hat neben der Unfallrate auch Einfluss auf das resultierende Schadensausmaß im Fall einer Kollision. Es wird empfohlen, das Schadensausmaß für Kollisionen ohne Brand mit dem Exponenten 1 gemäß dem Faktor

$$f_{SA}^{mechanisch} = \left[\frac{v_{zul}}{80 \frac{km}{h}} \right]$$

zu modellieren. Es ist angezeigt eine Ober- bzw. Untergrenzen für den Einsatz dieses Ansatzes zu definieren. Es wird aus diesem Grund zusätzlich vorgeschlagen, den Faktor für den Bereich zwischen einer Minimalgeschwindigkeit von 30 km/h und einer Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h anzuwenden. und für geringere bzw. höhere Geschwindigkeiten den Geschwindigkeitsfaktor der Minimalgeschwindigkeit von 30 km/h bzw. der Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h zu verwenden.

9.1.5 Schadensausmaßermittlung – Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR

9.1.5.1 Simulations- und Wirkungsmodelle

Um die Einwirkungen bei der Schadensausmaßermittlung zu berücksichtigen, wird ein Simulationsmodell benötigt, das die zeit- und raumdiskrete Berechnung der Wärme- und Stoffausbreitung in Abhängigkeit von der Entwicklung des Brandes sowie strömungsmechanischer Randbedingungen ermöglicht. Das Simulationsmodell sollte auf einem Brandmodell basieren, das eine brennstoffspezifische Modellierung erlaubt. Außerdem muss möglich sein, jede Art von Lüftungszuständen, sei es auf Basis von atmosphärischen Prozessen oder mechanischen Lüftungsanlagen sowie Löschmaßnahmen zu modellieren. Als Ergebnis der Berechnungen müssen mindestens Aussagen über Druck, Geschwindigkeit, Temperatur und Konzentration im Rechengebiet vorliegen. Hierfür geeignete Rechenprogramme (CFD-Modelle) sind z. B.:

- Fire Dynamics Simulator (FDS)
- OpenFOAM

Grundlage für die Modelle zur Ermittlung der Auswirkungen auf Nutzer und Bauwerk infolge eines Brandes bilden die mittels CFD-Berechnungen

raum- und zeitdiskret bestimmten Einwirkungen aus Druck, Wärme, Konzentrationen und Extinktion/Sichtweite.

Für weiterführenden Informationen zu den Wirkungen und deren quantitativer Ermittlung wird auf den Forschungsbericht verwiesen.

9.1.5.2 Brandverlauf-/kurven

Es lassen sich grundsätzlich folgende fünf Phasen unterscheiden:

- Phase 0: Zündung
- Phase 1: Brandentwicklung (Schwelen, Glimmen)
- Phase 2: Flashover (Feuersprung)
- Phase 3: Vollbrand
- Phase 4: Abklingender Brand

Zur Abbildung von Bränden im Rahmen von Risikoanalysen eine Differenzierung nach Pkw, Lkw (20 t) und schwerem Lkw (40t) empfohlen. Für Pkw ist eine Brandleistung von 5 MW zu verwenden. Für Lkw mit einem Gesamtgewicht bis zu 20 t sollte eine

Brandleistung von 30 MW und für schwere Lkw mit einem Gesamtgewicht ≥ 40 t eine Brandleistung von 100 MW angenommen werden. In Fällen in denen die Bemessungsbrandleistung für Die Auslegung der Lüftung oder einer Brandbekämpfungsanlage auf bereits auf 100 MW erfolgt ist eine weitere Brandlast für Lkw mit einer Brandleistung von ≥ 120 MW mit einzubeziehen.

Da die Phase der Brandentwicklung sehr unterschiedlich lange dauern kann, ist eine Unterscheidung in Szenarien mit einem schnellen und einem verzögerten Brandverlauf erforderlich. In Anlehnung an die Bemessungsbrandkurve nach ZTV-ING ist der Anstieg in der Energiefreisetzungsrate (HRR) mit $0,83$ MW/s anzunehmen. Dieser Anstieg ist bis zum Erreichen der jeweiligen fahrzeugtypischen Brandleistung zu verwenden. Zur Abbildung eines langsamen Brandverlaufs wird nach dem Erreichen des 5 MW-Niveaus, diese Brandleistung bis zur 5. Minute konstant gehalten, bevor eine weitere Zunahme in der Energiefreisetzungsrate mit $0,83$ MW erfolgt. Die Dauer der Vollbrandphase erfolgt entsprechend der ZTV-Ing Kurve. Den Vorschlag zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Brandverläufe zeigt Bild 28.

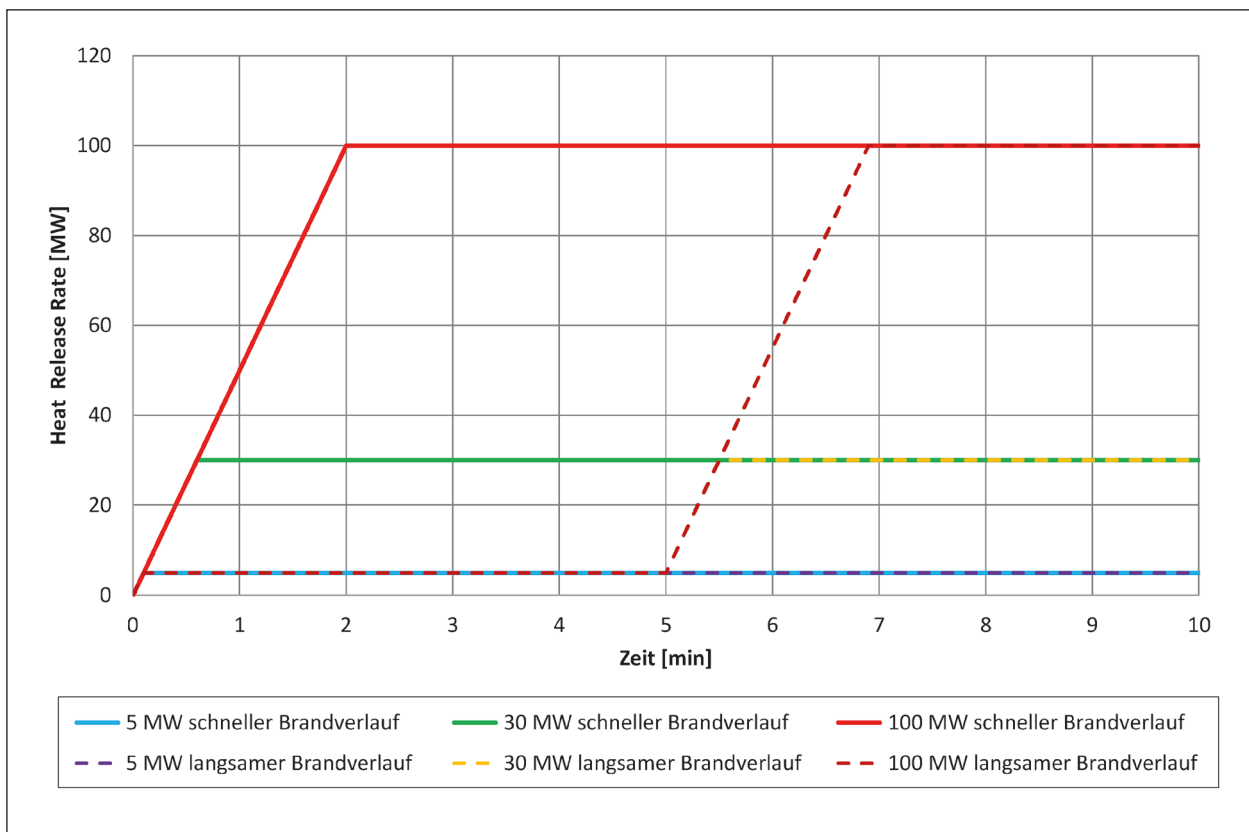


Bild 28: Vorschlag zur Abbildung von Brandleistungen

9.1.5.3 Weitere Einflussfaktoren

- **Detektionsverhalten**

Das Erkennen und Melden eines Ereignisses (Detektion) mit einer anschließenden Alarmierung der Tunnelnutzer hat einen wesentlichen Einfluss auf die Selbstrettungsmöglichkeiten und damit auch auf das zu erwartende Schadensausmaß.

- Entsprechend den Vorgaben in den EABT ist ein 5MW-Brand mittels einer automatischen Brandmeldeeinrichtung innerhalb von 60 sec zu detektieren.
- Forschungsprojekte zeigen, dass Brände durch die Systeme innerhalb von 15 sec erkannt werden konnten. Da ein mittels eines Videodetektionssystems erkannter Brand i. d. R. eine Bestätigung durch einen Operator bedarf, wird für eine überprüfte Branderkennung eine Detektionszeit von 30 sec empfohlen.
- Neben automatischen Systemen zur direkten Branderkennung stehen innerhalb eines Tunnels auch manuelle Brandmeldeeinrichtungen (Notruf, Betätigung Handfeuermelder) zur Verfügung, über die Tunnelnutzer einen Brand melden können. Es ist davon auszugehen, dass eine Alarmmeldung darüber 2 bis 3 Minuten in Anspruch nimmt.

- **Reaktion von Operatoren**

Aktuell liegen keine ausreichenden Datengrundlagen für erste Ansätze für Reaktionszeiten von Operatoren zugrunde. Hier sollten hier zusätzliche Informationen ermittelt bzw. zweckmäßige Ansätze festgelegt werden, sodass die Reaktionszeit in der gesamthaften Zeitschiene Platz findet

- **Aktivierung von Sicherheitseinrichtungen**

- Für Tunnel, die über eine mechanische Längslüftung mit Strahlventilatoren verfügen, müssen die Ventilatoren, deren Aktivierung nach dem zugrundeliegenden Brandprogramm vorgesehen ist, innerhalb von 60 Sekunden nach der Branddetektion ihre Soll-drehzahl erreicht haben.
- Im Fall eines Lüftungssystems mit einer Rauchabsaugung über Axialventilatoren, müssen innerhalb von 90 Sekunden die gemäß Brandprogramm erforderlichen Absperr-

und Absaugklappen geöffnet sowie die weiteren Klappen geschlossen sein sowie die Ventilatoren ihre Soll-drehzahl erreicht haben.

- Sperrschranken müssen innerhalb von 30 Sekunden nach dem Erkennen eines auslösenden Ereignisses eingefahren sein. Im Fall der Detektion eines Brandes über eine automatische Brandmeldeeinrichtung ist ein Einfahren ohne eine weitere Plausibilitätsprüfung zulässig.

- **Befolgungsgrad von Sperreinrichtungen**

In Österreich ist die Bewertung der Reaktionszeit eines Ampelsignals bzw. einer Schrankenanlage regulatorisch definiert. Dabei wird auf Basis von Expertenabschätzungen von einer 90-sekündigen Akzeptanzverzögerung ausgegangen bis Tunnelnutzer das Rotsignal beachten. Ist der Tunnel im Gegensatz dazu mit einer Schrankenanlage ausgestattet, wird von einer 60-sekündigen Akzeptanzverzögerung ausgegangen. Da in Deutschland eine Schrankenanlage für den Großteil der Tunnelanlagen zum Standard zählt, kann dieser für die Bewertung von z. B. Tunneln unter 400 m oder mit abweichender Ausstattung herangezogen werden. Ziel ist es, in die Zeitschiene einen entsprechenden Ansatz aufzunehmen, um unterschiedliche Befolgungsgrade von Sperreinrichtungen und unterschiedliche Sperrzeiten (z. B. unterschiedlicher Sperrsysteme) zu bewerten.

- **Reaktion von Tunnelnutzern**

Zur Berücksichtigung dieser Aspekte kann eine Analyse von Videoaufzeichnungen adäquater Unfallhergänge bzw. Unfallberichten bzw. auf die Erfahrung von Tunneloperatoren zurückgegriffen werden. Ebenso bieten Probandenversuche erste Ansätze. Ziel ist es, in die Zeitschiene einen entsprechenden Ansatz aufzunehmen, um unterschiedliche Reaktionszeiten bei einem Brand bzw. nach Brandalarm im Tunnel aufzunehmen und zu bewerten. Dies ist im Wesentlichen im Zusammenhang mit den vorhandenen Sicherheitssystemen zu sehen.

9.1.5.4 Selbstrettung

Zur Bestimmung der Schadensausmaße werden Aussagen zur Anzahl und Verteilung von Personen innerhalb des Tunnels erforderlich. Diese ist im Wesentlichen von folgenden Faktoren abhängig:

- Verkehrsaufkommen (DTV)
- Anzahl Fahrstreifen
- Fahrzeugdichte bei freiem Verkehr und Stau
- Fahrzeugbelegungsgrad
- Zeit zwischen Ereigniseintritt und Tunnel-sperrung

Die Berechnung der daraus resultierenden Personendichte, kann über die Theorie der kinematischen Wellen oder mithilfe eines Verkehrsflusssimulationsprogramms ermittelt werden. Durch die Überlagerung der ermittelten Personendichten mit den vorher bestimmten Bereichen für „Selbstrettung“, „bedingte Selbstrettung“ und „keine Selbstrettung“ kann dann das Schadensausmaß ermittelt werden. Für die Bereiche mit bedingter Selbstrettung kann angenommen werden, dass sich die Hälfte der betroffenen Personen aus diesem Bereich retten kann.

Das Abbilden der Selbstrettung bzw. des Verhaltens der Tunnelnutzer bedarf einer entsprechenden Modellierung. Für weiterführenden Informationen dazu wird auf den Forschungsbericht verwiesen.

9.1.5.5 Fremdrettung

Um Maßnahmen zur Unterstützung der Fremdrettung im Brandfall zu berücksichtigen kann z. B. die entsprechend hinterlegte Brandkurve in der Schadensausmaßberechnung abgeändert werden.

Um den Einfluss der Brandbekämpfung zu berücksichtigen ist in Abhängigkeit der Eintreffzeit am Ereignisort und dem Beginn der Löschmaßnahmen die Löschwirkung durch die Beaufschlagung mit einer Wassermenge von 1.200 l/min abzubilden. Die Wassermenge entspricht hierbei der bereitzustellenden Durchflussrate nach RABT/EABT.

Neben der Brandbekämpfung kommt den Rettungskräften auch die Aufgabe der Personenrettung zu. Dies gilt beispielsweise für Personen, die ihr Bewusstsein verloren haben oder mobilitätseinge-

schränkt sind und ihr Fahrzeug nicht selbständig verlassen können. Eine schnelle Rettung dieser Personen führt zur Reduktion von Schadensausmaßen. Die mit dem individuellen Eintreffen der Feuerwehr verbundenen Auswirkungen auf die Eintreffwahrscheinlichkeiten und Ausmaßminderungseffekte sind jeweils für den zu betrachtenden Tunnel zu bestimmen.

9.1.6 Risikobewertung

Es werden – aufbauend auf der in Heft B66 [5] vorgeschlagenen Übergangslösung – folgendes Vorgehen zur Risikobewertung empfohlen:

- Die Bewertung der Risiken erfolgt auf Basis eines relativen Vergleichs der kollektiven Risiken für den spezifisch zu untersuchenden Tunnel und dem Referenzfall eines vollständig richtlinienkonformen Tunnels (RABT/EABT).
- Die Bewertung erfolgt gesondert für die beiden Gefahrentypen „Kollision (ohne Brand)“ und „Brand ohne Gefahrgüter gemäß ADR“.
- Das Sicherheitsniveau des untersuchten Tunnels ist dann hinreichend bzw. akzeptabel, wenn die je Gefahrentyp ermittelten Risiken kleiner oder höchstens gleich sind wie für den Referenzfall.

Beim Referenzstunnel handelt es sich um einen „theoretischen“ Tunnel, der dem untersuchten realen Tunnel ähnlich ist, jedoch alle Anforderungen und Bedingungen der im konkreten Fall anzuwendenden Richtlinien bzw. Vorschriften vollständig erfüllt.

Ein Referenzstunnel dient zur Ermittlung eines Referenzrisikoprofils, das zur Bewertung des Risikos eines realen Tunnels verwendet wird. Dabei wird ein relativer Bewertungsansatz verfolgt, bei dem der Nachweis der Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus durch Relativvergleich mit einem Referenzstunnel erfolgt. Durch die Verwendung eines relativen Bewertungsansatzes kann der Einfluss von Unschärfen auf das Bewertungsergebnis minimiert werden.

Bei der Definition des Referenzstunnels sind (in Anlehnung an die EABT) die in Tabelle 47 angeführten Anforderungen zu berücksichtigen.

Sicherheitsparameter	Referenztunnel
Tunnellänge	Tunnellänge(n) der Tunnelröhre(n) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Tunnelsystem: Anzahl der Tunnelröhren bzw. Betriebsart	Tunnelsystem im Grunde gleich wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, bestehend aus Betriebsart (Gegenverkehr/Richtungsverkehr) und der Anzahl Tunnelröhren. Bei Tunneln mit einem DTV in der 15-Jahres-Prognose von über 10.000 Kfz je Tag und Fahrstreifen ist ein Richtungsverkehrstunnel als Referenztunnel heranzuziehen. Bei Tunneln mit einem DTV in der 15-Jahres-Prognose von kleiner gleich 10.000 Kfz je Tag und Fahrstreifen ist ein Gegenverkehrstunnel als Referenztunnel heranzuziehen.
Anzahl der Fahrstreifen	Anzahl an Fahrstreifen je Fahrtrichtung <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch keinen Seitenstreifen.
Fahrstreifenbreite	Querschnittsausbildung gemäß EABT (Bild 5: Tunnelquerschnitte), jedoch ohne Seitenstreifen.
Bauart, Querschnittsgeometrie	Bauart und Querschnittsform (Gewölbe, Rechteck etc.) des zu untersuchenden Tunnels soll weitestgehend beibehalten werden. Durch abweichendes Tunnelsystem, Regelquerschnitt (kein Seitenstreifen), etc. kann die Querschnittsgeometrie vom zu untersuchenden Tunnel abweichen, sollte jedoch aus baulicher Sicht einen plausiblen Querschnitt darstellen. Der Mindestquerschnitt nach EABT (Bild 6) ist allenfalls einzuhalten.
Unterirdische Zu- und Abfahrten im Tunnel	Sofern der zu untersuchende Tunnel (IST-Tunnel) unterirdische Zu- und Abfahrten aufweist, so sind diese auch beim Referenztunnel anzusetzen. Die Zu- und Abfahrten im Referenztunnel sind jedenfalls richtlinienkonform (z. B. gemäß RAA) zu gestalten.
Längsneigung	Längsneigung(en) der Tunnelröhre(n) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch maximal 3 %.
Trassierung	Trassierung <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Verkehrsaufkommen	Verkehrsaufkommen je Tunnelröhre (einschließlich der zeitlichen Verteilung) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel.
Anteil des Lkw-Verkehrs	Schwerverkehrsanteil (inkl. Busanteil) <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel, jedoch maximal 15 %.
Gefahr täglicher oder saisonaler Staubildung	Kein täglicher Stau infolge Verkehrsüberlastung, sowie keine saisonale Staubildung (deutliches Übersteigen des im Jahresdurchschnitt ermittelten täglichen Verkehrsaufkommens)
geschwindigkeitsbezogene Aspekte	Die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Tunnel ist entsprechend der Auslegungsgeschwindigkeit des zu untersuchenden Tunnels zu wählen.
Merkmale der Zufahrtsstraßen	Keine besonderen Merkmale an den Zufahrtsstraßen
geografische und meteorologische Verhältnisse	Geografische und meteorologische Verhältnisse <u>gleich</u> wie bei dem zu untersuchenden Tunnel
Lüftungssystem	Lüftungssystem bei Gegenverkehrstunneln gemäß EABT – Tabelle 7 entsprechend der jeweiligen Tunnellänge, wobei für Tunnel ab 600 m eine Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal zu wählen ist. Lüftungssystem bei Richtungsverkehrstunneln gemäß EABT – Tabelle 8 entsprechend der jeweiligen Tunnellänge, wobei für Tunnel ab 3.000 m eine Rauchabsaugung über steuerbare Klappen und Abluftkanal zu wählen ist.
Bemessungsbrandleistung	Bemessungsbrandleistung und Rauchgasmenge gemäß EABT – Tabelle 11 entsprechend der Lkw-Fahrleistung, wobei bei über 6.000 Lkw-km pro Tag und Röhre eine Brandleistung von 100 MW und eine Rauchgasmenge von 200 m ³ /s zu wählen ist.
Notausgangsabstand	Notausgangsabstand 300 m.
Sonstige Sicherheitseinrichtungen	Sonstige Ausstattung mit Sicherheitseinrichtungen gemäß EABT – Tabelle 3 in Abhängigkeit von der Tunnellänge.

Tab. 47: Festlegung von Sicherheitsparametern eines Referenztunnels

9.2 Weiterentwicklung auf Verfahrensebene

9.2.1 Grundlagen und Ereignisdaten

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden die Datengrundlagen, die auf den gesammelten Informationen der Ereignismeldebögen basieren, detailliert ausgewertet. Grundsätzlich ist die Datenstruktur in Bezug auf die Tunnelbauwerke und die Ereignisse klar, übersichtlich und sehr umfassend. Angesichts der sehr großen Zahl von erfassten Attributen (32 für Tunnel, ca. 200 für die gesamte Palette der erfassten Ereignisse) erscheint eine Reduktion der Zahl der Merkmale bei den Ereignissen aus Praktikabilitätsgründen, aber auch hinsichtlich einer Fokussierung auf relevante Informationen angezeigt. Hier stellt sich vor allem die Frage, zu welchen Ereignisarten – nebst Fahrzeugunfällen und -bränden, die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit untersucht werden – Auswertungen möglich sein sollen. Anstelle der heutigen Erfassungskriterien (Beteiligung von Einsatzdiensten oder Sperrung von mindestens einer Röhre) wäre es zielführend, anhand einer Positiv- und Negativliste festzulegen, welche Ereignisarten (nicht) zu erfassen sind.

Um die Vollständigkeit und Qualität der Daten für statistische Auswertungen zu verbessern und diese zu vereinfachen, werden folgende Maßnahmen vorgeschlagen.

Daten zu den Tunnelbauwerken (einmalige Aktualisierung pro Jahr)

- Ergänzung der Anleitung bzgl. der Erfassung von wichtigen quantitativen Merkmalen, die unterschiedlich festgehalten werden können. Dies betrifft insbesondere die Tunnellänge (Erfassung jeder einzelnen Röhre, keine Gesamtlänge), die Zahl der Fahrstreifen (Angabe pro Röhre, keine Gesamtzahl). Für die Erfassung von Daten, die von der Tunnelröhre abhängig sind, wäre u. U. eine obligatorische Gliederung nach „Teilbauwerken“ (Röhre 1 und 2, für Ausnahmefälle auch 3, 4 etc.).
- Der DTV sollte mindestens alle 5 Jahre, besser alle 3 Jahre, erfasst werden, zusätzlich nach signifikanten Umbauten, welche eine der in diesem Kapitel betrachteten Merkmale betreffen.
- Vollständigkeits- und Plausibilitätskontrolle bezüglich den wichtigsten ca. 20 Merkmale (dar-

unter alle hier erwähnten) durch eine zentral verantwortliche Stelle, ansonsten Rückweisung der Tunneldaten an den Erfasser.

Ereignisdaten

- Für die Auswertung wichtige Typisierungen sollten konsequent bei der Datenerfassung erfolgen. Dies betrifft insbesondere folgende Ereignismerkmale:

- Unfallart (allgemeiner: Ereignisart)
- Ort des Ereignisses (innerhalb oder außerhalb des Tunnels)

Freitexteingaben sollten hier nicht zulässig sein und konsequent unterbunden werden.

- Es sollte geprüft werden, wie die Verwendung von „sonstige Unfälle“ reduziert werden kann. Ist dies eine Folge von Unklarheiten bei der Wahl zwischen zwei Alternativen, so ist es evtl. zielführender, konsequent die eine der beiden anzugeben (Bsp.: Unterschied zwischen Auffahr- und Spurwechselunfälle). Ggf. kann auch die Gliederung der Unfallarten angepasst werden (Zusammenfassung von Auffahr- und Spurwechselunfälle).
- Es sollte jährlich geprüft werden, ob Auffälligkeiten bei der Erfassung wichtiger Ereignismerkmale festzustellen sind. Ein Beispiel dafür ist die häufige (im Falle des Elbtunnels sogar ausschließliche) Verwendung der Unfallart „sonstige Ereignisse“.
- Eine Ereignisbeschreibung in einem Satz (bzw. mit Stichworten) ist zwar nicht systematisch auswertbar, gibt aber für den Auswertenden wichtige Anhaltspunkte, wie ein Ereignis einzuordnen ist und hilft, fehlende Merkmale im Nachhinein zu ergänzen. Wenn der Mehraufwand für die Erfassenden nicht klar dagegenspricht, sollte eine solche zukünftig festgehalten werden.
- Allenfalls können die für den Ablauf eines Ereignisses jeweils maßgeblichen Begleitumstände angegeben werden.
Bsp.: Staubbildung (falls diese einen Auffahrunfall begünstigt hat).
Begleitumstände in diesem Sinne sind weder (meldepflichtigen) Ereignisse noch Ursachen von letzteren, sondern sollen helfen, den Kontext, den Ablauf, wichtige Randbedingungen etc.

von Ereignissen besser zu beschreiben. Die Nennung mehrerer Begleitumstände aus einer längeren Liste (ggf. ergänzt um Freitext) kann helfen, auf eine Vielzahl fix vorgegebener Ereignismerkmale zu verzichten und somit deren Zahl zu reduzieren.

Mögliche vertiefte Analysen

Die im Zuge des Forschungsarbeiten vorgenommenen Analysen zur Häufigkeit von Fahrzeugunfällen beschränken sich auf die Analyse von mittleren Unfallraten für mehr oder weniger homogene Gruppen von Tunnel. Eine deutlich anspruchsvollere, ergänzende Art der Analyse wäre eine „multi criteria analysis“. Dabei handelt es sich um eine mehrdimensionale Prüfen von Korrelationen von kontinuierlichen (z. B. Röhrenlänge, DTV pro Fahrstreifen, Höchstgeschwindigkeit, Anteil Schwerverkehr) und diskreten Tunnelmerkmalen (z. B. Verkehrsart, Zahl der Zu-/Abfahrten, Vorhandensein von Seitenstreifen) mit dem Ziel, eine analytische Formel abzuleiten, anhand derer für einen beliebigen Tunnel ein Schätzwert für die Unfallrate (pro Unfallart) ermittelt werden kann, der bestmöglich mit den statistischen Erfahrungswerten in Einklang steht. Die Ableitung einer solchen Beziehung basiert auf gewissen Annahmen (insbesondere hinsichtlich der Berücksichtigung kontinuierlicher Variablen, z. B. in Bezug auf funktionale Zusammenhänge), wobei die Güte des Modells durch Variation der Annahmen innerhalb gewisser Grenzen verbessert werden kann. Eine solche Betrachtung würde es erlauben, Unterschiede in der Unfallhäufigkeit bzw. Rate zwischen einem realen Tunnel und dem zugehörigen Referenz-tunnel bestmöglich quantitativ abzuschätzen und einer Risikobewertung zugänglich zu machen.

9.2.2 Fortschreibung Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln

Eine vertiefende quantitative Sicherheitsbewertung für Straßentunnel kann erfahrungsgemäß aufwändig sein. Aus diesem Grund wurde für wenig kritische Fälle (geringfügige Abweichungen vom Regelwerk und/oder generell eher geringe Risiken) ein vereinfachtes Verfahren entwickelt und im „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5)“ [4] dokumentiert. Eine Anpassung der darin definierten „Voranalyse zur Grobbeurteilung von Risiken und Krite-

rien für den erforderlichen Tiefgang in der Sicherheitsbewertung“ wird als zweckmäßig erachtet. Dabei sollten entsprechend auch die im vorliegenden Forschungsprojekt vorgeschlagenen Anpassungen auf Modellebene berücksichtigt bzw. abgebildet werden.

9.2.3 Sammeln und Auswertung von praktischen Anwendungserfahrungen

Werden die methodischen Weiterentwicklungen aufgenommen und umgesetzt, so wird empfohlen, die praktischen Erfahrungen in der Anwendung der Sicherheitsbewertung in zwei bis drei Jahren wieder einer gezielten Evaluation zu unterziehen und zu analysieren, inwieweit sich die Weiterentwicklungen bewährt haben und welche praktischen Fragen und Probleme ggf. aufgetaucht sind. Dazu wird ein Anwenderdialog angeregt, vergleichbar zum Fachworkshop im Rahmen des Forschungsprojektes.

Literatur

- [1] European Union, "Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network," 29 April 2004
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)“, 2006
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement, „Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h (EABT-80/100)“, 2019
- [4] Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006 (Abschnitt 0.5), BMVBS/BAST, März 2009
- [5] ZULAUF et al., FE 03.378/2004/FRB „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 66, ISBN 978-3-86509-909-9, 2009
- [6] World Road Association PIARC Committee C3.3 (2008), "Risk Analysis for Road Tunnels", World Road Association PIARC Technical Committee C3.3 Road tunnel operation, ISBN 2-84060-202-4, 2008
- [7] World Road Association PIARC Committee C4 (2012), "Current practice for risk evaluation for road tunnel", World Road Association PIARC Technical Committee C4 Road tunnel operation, ISBN 978-2-84060-290-3, 2012
- [8] RITUN-Leitfaden zur Verbesserung der Resilienz von Straßentunneln, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020
- [9] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, "RVS 09.03.11 – Tunnel risk modell (TuRisMo)", 09.03.2015
- [10] ILF Consulting Engineers, "Arbeitsbericht zum Ausschuss Tunnel-Sicherheit – Erweiterung und Vertiefung des österr. Tunnelrisikomodells gem. RVS 09.03.11", 31.03.2015
- [11] MAYER, G. und BALTZER, W. (2003): Quantitative Sicherheitsbewertung und optimierte Fluchtwegkennzeichnung für Brandunfälle in Straßentunneln, STUVA, Forschung + Praxis, Bd. 40, Bauverlag BV, ISBN 3-7625-3602-3
- [12] MAYER, G. (2006): Brände in Straßentunneln: Abschätzung der Selbstrettungsmöglichkeiten der Tunnelnutzer mittels numerischer Rauchausbreitungssimulation, Dissertation, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Heft 47, ISBN 3-925163-37-9
- [13] MAYER, G., BRENNBERGER, S., GROßMANN, S. (2015): Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Brücken- und Ingenieurbau, Heft B115, Bergisch Gladbach, Juni 2015, ISBN 978-3-95606-174-5 (PDF)
- [14] FE 82.334/2007: Bewertungsmodell für die Verkehrssicherheit von Landstraßen, BAST Heft V 226
- [15] FE 16.0012/2009: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten, BAST Heft V 283
- [16] Warvw 2013, «Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels», Gesetz vom 2. Februar 2006
- [17] Rarvw 2013, «Regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels», De Minister van Verkeer en Waterstaat
- [18] QRA-tunnels 2.0, Achtergrondsdocument, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012
- [19] Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0, Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012
- [20] VRC-Richtlijnen 2009, Veiligheidsrichtlijnen deel C, bijlagen, Inhoudsopgave, versie 2009
- [21] Bundesamt für Strassen, Richtlinie „Risikoanalyse für die Tunnel der Nationalstrassen“, Richtlinie 19004, Ausgabe 2014
- [22] Bundesamt für Strassen, Dokumentation „Risikokonzept für die Tunnel der Nationalstrassen“, Dokumentation 89005, Ausgabe 2014
- [23] World Road Association PIARC Committee C4 (2012), "Current practice for risk

- evaluation for road tunnel”, World Road Association PIARC Technical Committee C4 Road tunnel operation, ISBN 978-2-84060-290-3
- [24] Centre d'Etudes des Tunnels, Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers, Fascicule 4, Les études spécifiques des dangers (ESD), September 2003
- [25] BAST, „Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln“, Heft B 143, April 2018
- [26] FE 03.344/2001/FRB : STEINAUER, B., MAYER, G., BRAKE, M., HAACK, A. SCHREYER, J. und GRÜNEWALD, M.: Brand- und Störfalldetektion in Straßentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW), Bonn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 925, ISBN 978-3-86509-357-8, 2005
- [27] FE 03.0437/2007/FRB: Verfahren zur Kategorisierung von Straßentunneln gemäß ADR 2007
- [28] Handbuch für die Bewertung der Verkehrssicherheit von Straßen (HVS)
- [29] NILSSON, G. (2004): Traffic Safety Dimensions and the Effect of Speed on Safety, Bulletin 221, Lund Institute of Technology, Department of Technology and Society, Traffic Engineering
- [30] ELVIK, R. (2009): The Power Model of the relationship between speed and road safety, TOI report 1034/2009
- [31] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19), FGSV 052. Ausgabe 2019
- [32] Bundesamt für Strassen, „Elektromobilität und Tunnelsicherheit – Gefährdungen durch Elektrofahrzeugbrände“, Forschungsprojekt VSS 2016/221, Juni 2018
- [33] LEHAN, SENEKOWITSCH, „Reproduction of human behaviour in risk models – validation of the relevant risk parameters based on proband tests“, 9th interational converence ‘Tunnel Safety and Ventilation’, Mai 2018
- [34] SEIKE, KAWABATA, HASEGAWA, “Evacuation locus in a full-scale tunnel experiment”, virtual converence ‘Tunnel Safety and Ventilation’, Dezember 2020
- [35] HURLEY, M. J. et al., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2016
- [36] INGASON, H., YING ZEHN, L., LÖNNERMARK, A., Tunnel fire dynamics, Springer, New York, 2015
- [37] ISO/TC 92/SC 3 Fire threat to people and environment, ISO 13571 – Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires, 2012
- [38] RIMEA e. V., Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, 10.03.2016
- [39] VFDB, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, November 2013.
- [40] BAST, “Wirtschaftlichkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln”, Forschungsprojekt FE 15.0564/2012/ERB, September 2014
- [41] Hinweise zur Handhabung des Ereignismeldobogens, Fachveröffentlichung der Bundesanstalt für Straßenwesen
- [42] Verkehr in Zahlen 2020/2021, 49. Jahrgang, Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, September 2020

Tabellen

- Tab. 1: Festlegung von Sicherheitsparametern eines Referenz隧nells
- Tab. 2: Beispiele für inkonsistente bzw. fehlende Angaben zur Zahl der Fahrstreifen: Werte pro Röhre (gelb dargestellt), Summenwerte über zwei Röhren (grün dargestellt) und fehlende Angaben (rot markiert)
- Tab. 3: Effektive Angaben zur Unfallart (Anzahl Einträge in der Access-Datei, links) und gemäß Anleitung zulässige Einträge über ein Auswahlfeld in der zur Datenerfassung genützten Excel-Datei. Fehlende Angaben zur Unfallart sowie die Angabe „-“ wurden als „kein Unfall“ interpretiert.

- Tab. 4: Zahl der in der Access-Datenbank erfassten Tunnel gegliedert nach Verkehrsart, dem Vorhandensein einer Zu- bzw. Abfahrt sowie nach Straßentyp. Zudem ist ersichtlich, zu wie vielen Tunneln Angaben zum DTV in der Access-Datenbank vorhanden sind bzw. fehlen.
- Tab. 5: Anzahl Unfälle gegliedert nach Unfallort, Anzahl Todesopfer und Unfallart
- Tab. 6: Vergleich der Unfallraten gemäß Auswertung in Heft B66 (Analyse aus dem Jahr 2007) und der Auswertung im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit (Tunnelunfälle 2009 – 2019).
- Tab. 7: Zuordnung zwischen den Unfallarten in der Ereignisstatistik und den Unfalltypen gemäß Merkblatt für die Auswertung von Straßenverkehrsunfällen
- Tab. 8: Schadenausmaßverteilung nach Unfalltypen: statistische Auswertungen anhand der Tunnelunfälle zwischen 2009 und 2019 im Vergleich zu den mit Schätzungen angereicherten Werten im Heft B66).
- Tab. 9: Kenngrößen zur Zahl der Unfälle, gegliedert nach Unfallart, sowie zu den daraus resultierenden Fahrzeug- und sonstigen Bränden. Zudem sind die resultierenden Brandwahrscheinlichkeiten bzw. -raten tabelliert. Zum Vergleich sind auch Brände aufgeführt, die ihre Ursache nicht in Unfällen haben.
- Tab. 10: Basis-Unfallraten
- Tab. 11: Zu-/Abfahrtfaktor $f_{Z/A}$
- Tab. 12: Längenfaktor f_L
- Tab. 13: Fahrstreifenfaktor f_{FS} (der Fall von 4 Fahrstreifen pro Richtung gibt es derzeit in der Praxis nicht, deshalb die Verwendung der kleineren Schrift).
- Tab. 14: Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB} (Quelle: BASt Heft V226)
- Tab. 15: Seitenstreifenfaktor f_{SS}
- Tab. 16: Verkehrsaufkommensfaktor
- Tab. 17: Geschwindigkeitsfaktor f_v
- Tab. 18: Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$
- Tab. 19: Lkw-Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Längsneigung (Quelle: RABT 2006, EABT 80/100)
- Tab. 20: Statistisch nachgewiesene Exponenten des Power-Modells für ausgewählte Beobachtungsgrößen
- Tab. 21: Fractional Lethal Dose – Werte
- Tab. 22: Fractional Irritant Concentration – Werte
- Tab. 23: Modifikation der Wahrscheinlichkeit eines Vollbrandes, nach Tabelle 38 aus Ref. [9]
- Tab. 24: Zeitdauern und max. HRR (Quelle: PIARC 2011)
- Tab. 25: Energiefreisetzungsraten (Quelle: PIARC)
- Tab. 26: Grundparameter
- Tab. 27: Häufigkeiten H_0 von Initialereignissen
- Tab. 28: Verteilung Häufigkeiten der Brandereignisse
- Tab. 29: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge einer Kollision
- Tab. 30: Verzweigungen im Ereignisablauf infolge eines Brandes
- Tab. 31: Schadensausmaße infolge Kollision
- Tab. 32: Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten
- Tab. 33: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Heft B66)
- Tab. 34: Verzweigung Personenrettung im Ereignisablauf infolge eines Brandes
- Tab. 35: Ermittelte Risikowerte der Untersuchungsvarianten
- Tab. 36: Vergleichende Gegenüberstellung der ermittelten Risikowerte (prozentuale Abweichungen zum Heft B66)
- Tab. 37: Basis-Unfallraten
- Tab. 38: Zu-/Abfahrtfaktor $f_{Z/A}$
- Tab. 39: Längenfaktor f_L
- Tab. 40: Fahrstreifenfaktor f_{FS}
- Tab. 41: Fahrstreifenbreitenfaktor f_{FSB} (Quelle: BASt Heft V226)

Tab. 42: Seitenstreifenfaktor f_{SS}

Tab. 43: Verkehrsaufkommensfaktor

Tab. 44: Geschwindigkeitsfaktor f_v

Tab. 45: Differenzgeschwindigkeitsfaktor $f_{\Delta v}$

Tab. 46: Lkw-Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Längsneigung

Tab. 47: Festlegung von Sicherheitsparametern eines Referenztunnels

Bild 10: Gliederung der 80 Fahrzeugbrände zwischen 2009 und 2019 nach betroffenem Fahrzeug und Brandgröße

Bild 11: Beispiel für einen Ereignisbaum [11]

Bild 12: Maßgebliche Verkehrszustände im Richtungsverkehrsbetrieb

Bild 13: Zusammenhang zwischen Sichtweite und Fluchtgeschwindigkeit für reflektierende Objekte

Bild 14: Abhängigkeit von Brandlast, Zündung, Sauerstoff (Branddreieck) (Quelle: Siemens 2016)

Bild 15: Brandverlauf in den einzelnen Brandphasen und Bemessungsbrandkurven (MAYER, 2020)

Bild 16: Vergleich Temperaturentwicklung ZTV-ING/Simulation (Quelle: MAYER, BRENNBERGER, GROßMANN, 2013)

Bild 17: Idealisierte HRR-Kurve der PIARC (Quelle: PIARC 2011)

Bild 18: Brandverläufe aus Runehamer Brandversuchen (Quelle: INGASON, H. und LÖNNERMARK, A., 2005)

Bild 19: Bemessungskurve für Brand infolge Unfall gemäß VRC Richtlinien 2009

Bild 20: Bemessungskurve für Brand infolge Unfall gemäß VRC Richtlinien 2009

Bild 21: Vorschlag zur Bild von Brandleistungen

Bild 22: Selbstrettungsbereiche [12]

Bild 23: HA-Diagramm der Unfallrisiken

Bild 24: HA-Diagramm der Brandrisiken

Bild 25: HA-Diagramm der Gesamtrisiken

Bild 26: HA-Diagramm der Brandrisiken mit und ohne Fremdrettungseinfluss

Bild 27: HA-Diagramm der Gesamtrisiken

Bild 28: Vorschlag zur Bild von Brandleistungen

Bilder

Bild 1: Arbeitsplan

Bild 2: Schematischer Arbeitsplan von AP3

Bild 3: Darstellung der Risiken in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptabilitätsbereichen

Bild 4: Anzahl erfasste Fahrzeugunfälle bzw. restliche Ereignisse pro Tunnel (links hineingezoomt in den Bereich Unfallzahlen unter 500)

Bild 5: Kumulierte Fahrleistung über alle Tunnel in Abhängigkeit der Verkehrsart gegliedert nach 4 (Richtungsverkehr) bzw. 2 DTV-Klassen und 5 Längsklassen (ohne Berücksichtigung Elbtunnel sowie Tunnel ohne DTV-Angabe; DTV-Klasse basierend auf dem Wert für das Referenzjahr)

Bild 6: Entwicklung der jährlich erfassten Zahl an Fahrzeugunfällen in oder in der Nähe von Tunneln, gegliedert nach Unfallart

Bild 7: Entwicklung der jährlich erfassten Zahl an Fahrzeugbränden in oder in der Nähe von Tunneln

Bild 8: Anzahl Fahrzeugunfälle bzw. -brände gegliedert nach Unfallort (innerhalb bzw. außerhalb des Tunnels)

Bild 9: Vergleich der mittleren Unfallrate über die jeweils angegebene Zahl von Gegenverkehrs- bzw. Richtungsverkehrstunnel in Deutschland (Netz der BAB und Bundesstraßen) bzw. der Schweiz (Nationalstraßennetz)

Im Anhang

Bild 29: Unfallrate pro Tunnel gegliedert nach Fahrzeugunfall (alphabetisch nach Tunnelname, Teil 1)

- Bild 30: Unfallrate pro Tunnel gegliedert nach Fahrzeugunfall (alphabetisch nach Tunnelname, Teil 2)
- Bild 31: Mittlere Unfallrate gegliedert nach Verkehrsart und Vorhandensein von Zu-/Abfahrt – innerhalb des Tunnels. Bsp. Zahlenwerte: Bei Gegenverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrten haben sich über eine Fahrleistung von 2,2 Mia. Fahrzeug-km 21 Spurwechselunfälle ereignet.
- Bild 32: Mittlere Unfallrate gegliedert nach Verkehrsart und Vorhandensein von Zu-/Abfahrt – alle Unfälle. Bsp. Zahlenwerte: Bei Gegenverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrten haben sich über eine Fahrleistung von 2,2 Mio. Fahrzeug-km 21 Spurwechselunfälle ereignet.
- Bild 33: Mittlere Unfallrate für Richtungsverkehrstunnel nach Vorhandensein von Zu-/Abfahrt und Anzahl Fahrstreifen
- Bild 34: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach Vorhandensein von Zu-/Abfahrt und DTV pro Fahrstreifen
- Bild 35: Mittlere Unfallrate von Gegenverkehrstunneln gegliedert nach Tunnellänge
- Bild 36: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach Tunnellänge
- Bild 37: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrt gegliedert nach der Tunnellänge
- Bild 38: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrt und mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach der Tunnellänge
- Bild 39: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrt nach dem Anteil Schwerverkehr
- Bild 40: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln ohne Zu-/Abfahrt und mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen zwischen 6.000 und 18.000 Fahrzeuge/Tag nach dem Anteil Schwerverkehr
- Bild 41: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu-/Abfahrt sowie eines Seitenstreifens
- Bild 42: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen über 12.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu-/Abfahrt sowie eines Seitenstreifens
- Bild 43: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu-/Abfahrt sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit
- Bild 44: Mittlere Unfallrate von Richtungsverkehrstunneln mit einem Verkehrsaufkommen pro Fahrstreifen über 12.000 Fahrzeuge/Tag gegliedert nach dem Vorhandensein einer Zu-/Abfahrt sowie der zulässigen Höchstgeschwindigkeit
- Bild 45: Unfallraten gegliedert nach Unfallart und Unfallschwere. Ausgewertet wurden sämtliche Unfälle innerhalb von Tunneln über die gesamte Auswerteperiode (gesamte zugrunde liegende Fahrleistung: 18,1 Mia Fahrzeug-km)
- Bild 46: Unfallrate pro Tunneltyp (Gliederung nach Verkehrsführung und Vorhandensein Zu-/Abfahrt) gegliedert nach der Unfallschwere. Ausgewertet wurden alle Unfälle innerhalb von Tunneln.
- Bild 47: Rate der Unfälle mit Personenschäden (mindestens ein Leichtverletzter) gegliedert nach Tunneltyp und nach Unfallart. oder Todesopfern Einfluss Tunnelmerkmale auf Unfallrate: Verkehrsart und Zu-/Abfahrt. Ausgewertet wurden alle Unfälle innerhalb von Tunneln, die mindestens einen Leichtverletzten gefordert haben.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2018

B 143: **Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: **Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: **8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**

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

2019

B 147: **Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

2020

B 146: **Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister

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

B 148: **Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

Maurer, Bettin

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

B 149: **Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: **Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan

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

B 151: **Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner

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

B 152: **Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

Kuhlmann, Stempniewski

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

B 153: **Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: **Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

B 155: **Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

Wirker, Donner

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

B 156: **Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka

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

B 157: **9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband**

€ 16,00

B 158: **Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack

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

B 159: **Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lehhardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: **Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager**

Butz

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

B 161: **Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

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

B 162: **Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit**

Müller

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

B 163: **Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen**

Hindersmann

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

B 164: **Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten**

Kleinert, Sawo

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

B 165: **Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen**

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

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

B 166: **Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen**

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

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

B 167: **Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staack, Eilers € 15,50

**B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke
Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis
von instrumentierten Fahrbahnübergängen**

Rill

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

**B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende
Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

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

**B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für
Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rade-
macher, Ungermann

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

**B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung
durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Un-
manned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

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

**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfas-
sung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträ-
gern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke,
Wang, Wiggerhauser

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

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelin-
nenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

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

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

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

**B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten
Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen
Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)**

Purtak, Möbius

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

**B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus
Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen**

Staeck

€ 15,00

**B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke
Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung
von Messdaten**

Freundt, Böning, Fischer, Lau

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

**B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im
Digitalen Testfeld Autobahn**

Windmann

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

**B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für
die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutsch-
land**

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

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

**B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstrukti-
onen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung**

Schreck, Decker, Wawrzyniak

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

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

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

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

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

**B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Über-
prüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen**

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennerberger, Zulauf,
Locher

€ 18,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Web-
site finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf
Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.